

João Roque Dinis

Caracterização e modelação de caldas de cimento-argila no âmbito do
melhoramento dos terrenos

Lisboa
2010

UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Civil

**Caracterização e modelação de caldas de cimento-argila no âmbito do
melhoramento dos terrenos**

João André de Figueiredo Roque Dinis

Dissertação apresentada na Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil –
Estruturas e Geotecnia

Orientador: Professor Doutor João Paulo Bilé Serra

Lisboa
2010

Agradecimentos

Para a elaboração desta dissertação tive o contributo de algumas pessoas a quem quero agradecer. Estas pessoas contribuíram directa e indirectamente para conseguir concretizá-la.

Desde já o meu profundo agradecimento ao meu orientador Professor Doutor João Paulo Bilé Serra pela orientação, auxílio, disponibilidade, incentivo e por tudo o que de novo me ensinou.

A todos os professores que me auxiliaram de alguma forma no esclarecimento de dúvidas relacionadas com assuntos específicos no decorrer deste trabalho.

Aos meus amigos, pelo incentivo, motivação, compreensão e amizade que demonstraram ao longo deste processo.

Por fim, à minha família, em especial aos meus pais e irmão, que todos os dias me apoiaram incondicionalmente e a quem quero expressar a minha imensa gratidão.

A todos muito obrigado.

Resumo

A sobre-utilização dos terrenos é um dos motivos que torna necessária a construção de obras subterrâneas ou em solos de fracas características mecânicas. Como tal, nos últimos anos têm sido desenvolvidas diversas técnicas de melhoramento dos solos, como a injeção de caldas. Esta técnica tem diversos campos de aplicação, não se cingindo a sua utilização apenas à construção de obras novas. Pode também ser utilizada no reforço de estruturas já existentes, corrigindo ou prevenindo diversas anomalias geotécnicas relacionadas com o terreno de fundação.

O objectivo desta dissertação é dar um contributo no conhecimento e desenvolvimento desta técnica de melhoramento de terrenos por injeção, através da caracterização de uma calda de cimento-bentonite, e estudar a sua aplicabilidade através de um modelo computacional.

Para satisfazer o objectivo proposto, em primeiro lugar identificam-se os objectivos e campos de aplicação da injeção, e faz-se referência ao processo de dimensionamento e planeamento através da identificação dos materiais e dos parâmetros de injeção, bem como da instrumentação utilizada numa obra deste tipo. De seguida, caracteriza-se a calda de cimento-argila/bentonite, com especial relevância para a determinação da sua resistência à tracção, com base num modelo computacional baseado em ensaios existentes na literatura. Finalmente, estuda-se o comportamento do terreno quando aplicada a injeção da calda de cimento-bentonite, através de um modelo computacional simulando a escavação de um túnel e gradual processo de tratamento por injeção.

Abstract

Ground overuse is one of the reasons that make underground and in weak soils works necessary. Thus, recently various ground improvement techniques have been developed, such as the grout injection technique. This technique has many application fields, which are not limited to new constructions. It can also be used to strengthen existing structures, correcting or preventing many geotechnical problems related with the foundation ground.

The objective of this dissertation is to give my contribution to a better knowledge and development of this ground improvement technique - grout injection – through the characterization of an injection grout of cement-bentonite, and to study its applicability through a computer model.

To meet this objective, first the objectives and the application fields of an injection project are identified, and reference is made to the design and planning process through the recognition of the materials and injection parameters, as well as the instrumentation used in this kind of work. Then, the cement-bentonite grout is characterized based on a computer model related with an existing literature case. Finally, the behaviour of the ground when injection is applied is studied through a computer model, by the simulation of a tunnel excavation and simultaneous injection process.

Glossário

b	largura do provete	[m]
c	coesão	[Pa]
d	espessura equivalente de uma secção	[m]
D	diâmetro do provete	[m]
E	módulo de elasticidade ou de Young	[Pa]
EA	rigidez axial de uma estrutura	[N]
EI	rigidez de flexão de uma estrutura	[N.m ²]
f_c	resistência à compressão uniaxial	[Pa]
$f_{ck,cube}$	resistência característica à compressão aos 28 dias de provetes cúbicos com aresta 150mm	[Pa]
f_e	resistência equivalente à flexão	[Pa]
f_t	resistência à tracção	[Pa]
k_h	coeficiente de permeabilidade horizontal	[m/s]
k_p	coeficiente de impulso passivo	-
k_v	coeficiente de permeabilidade vertical	[m/s]
G	módulo de distorção	[Pa]
h	altura do provete	[m]
L	comprimento do provete	[m]
P	carga pontual	[N]
p	pressão aplicada	[Pa]
r_0	raio inicial de um túnel	[m]
r_e	raio da zona plastificada de um solo em torno de um túnel	[m]
T_b	índice de tenacidade	[J]
u	deslocamento relativo de dois pontos diametralmente opostos de um túnel (convergência)	[m]
β	coeficiente de transferência de tensões ao corte	-
δ	deslocamento do provete	[m]
ε	deformação	-
ε_0	deformação correspondente à resistência máxima à compressão	-
ε_{cu}	deformação correspondente à resistência última à compressão	-

φ	ângulo de atrito do solo	º
γ	peso específico total de um material	[kN/m ³]
γ_{sat}	peso específico de um material saturado	[kN/m ³]
λ	coeficiente de desconfinamento	-
ν	coeficiente de Poisson	-
ψ	dilatância do solo	º
ρ	massa volúmica ou específica	[kg/m ³]
σ	tensão	[Pa]
σ_0	tensão geo-estática inicial de um solo	[Pa]
σ_e	tensão instalada na zona plastificada em torno de uma secção de túnel	
$\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}$	tensões normais segundo os eixos principais x, y e z	[Pa]

Índice

Introdução	1
1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS.....	3
1.1. Definição e Objectivos da Injecção de Calda.....	3
1.2. Avaliação da Injectabilidade e Avaliação do Risco	4
1.3. Metodologia	5
1.4. Critérios de Dimensionamento e Apreciação do Local de Aplicação	6
1.5. Materiais e Produtos	7
1.5.1. Materiais das Caldas	7
1.5.2. Caldas.....	8
1.5.3. Tipos de Calda – Caldas de Cimento	10
1.5.4. Dimensionamento da Mistura e Ensaios.....	12
1.6. Aplicação da Calda	12
1.6.1. Sistema de Furação e Limpeza	14
1.6.2. Furação Padrão e Dimensionamento do Furo	15
1.6.3. Sequência de Injecção da Calda	15
1.6.4. Pressão de Injecção	16
1.7. Supervisão, Monitorização e Controlo	17
2. EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS.....	19
2.1. Equipamento.....	19
2.1.1. Perfuração	19
2.1.2. Mistura, Preparação da Calda e Ensaios de Controlo	20
2.1.3. Bombagem e Condução	22
2.1.4. Injecção e Aplicação	22
2.2. Técnicas Fundamentais	24
2.2.1. Injecções de Permeação	26
2.2.2. Injecções em Maciços Rochosos.....	26
2.2.3. Injecções de Compactação.....	27
2.2.4. Jet Grouting	28
2.2.5. Injecções de Compensação.....	29
2.2.6. Injecções de Fracturação Hidráulica.....	29

3.	Ensaio de caracterização de uma calda de cimento-bentonite	35
3.1.	Caldas de cimento-bentonite	35
3.1.1.	Penetrabilidade	35
3.1.2.	Composição típica. Influência nos parâmetros reológicos	37
3.1.3.	Caracterização, controlo de qualidade e controlo de desempenho.....	37
3.2.	Material ensaiado	37
3.2.1.	Componentes	37
3.2.2.	Preparação da calda	39
3.3.	Programa de ensaios	40
3.4.	Ensaio corrente de caracterização da calda	41
3.4.1.	Ensaio de fluidez (método do cone)	41
3.4.2.	Exsudação.....	41
3.4.3.	Variação de volume.....	42
3.4.4.	Tempo de presa	42
3.5.	Ensaio para caracterização de propriedades mecânicas – deformabilidade e resistência	43
3.5.1.	Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico	43
3.5.2.	Ensaio de compressão simples.....	43
3.5.3.	Ensaio de flexão.....	44
3.5.4.	Ensaio indirecto à tracção – Placa circular com modo de rotura determinado.....	45
4.	Modelação de Ensaio de uma Placa Circular de Calda de Cimento-Bentonite .	47
4.1.	Influência da tracção e ensaios de avaliação do comportamento de uma calda	47
4.1.1.	Ensaio para caracterização da resistência à tracção	48
4.1.2.	Ensaio de Placa Circular com Modo de Rotura Imposto	58
4.2.	Modelação numérica do ensaio de uma Placa Circular com Modo de Rotura Imposto	61
4.2.1.	Exigências	61
4.2.2.	Modelo Constitutivo	62
4.3.	Calibração do Software ANSYS com base num documento	66
4.3.1.	Geometria e Condições de Fronteira	66
4.3.2.	Material.....	67
4.3.3.	Malha.....	68
4.3.4.	Solução	69

4.3.5.	Análise e comparação dos resultados	69
4.4.	Obtenção dos Parâmetros do Material Calda de Cimento-bentonite com base na modelação numérica.....	71
4.4.1.	Módulo de Elasticidade.....	73
4.4.2.	Resistência à Tracção	74
4.4.3.	Comparação dos Resultados.....	75
5.	AS INJECCÕES DE COMPENSAÇÃO NO CONTROLO DA SUBSIDÊNCIA...	77
5.1.	A subsidência na escavação dos túneis. Métodos de análise	77
5.2.	O caso de estudo	80
5.2.1.	Modelo	80
5.2.2.	Processo de cálculo.....	83
5.2.3.	Fases de Cálculo	83
5.2.4.	Comparação dos resultados	110
6.	Considerações Finais.....	113
	Referências Bibliográficas	117

Índice de Figuras

Figura 2.1– Sonda rotativa	20
Figura 2.2 – Misturador de caldas coloidais	21
Figura 2.3 – Sistema de tube-à-manchette e obturador duplo	23
Figura 2.4 – Organização e caracterização das técnicas de injeção de calda para melhoramento de solos [3]	24
Figura 3.1 – Curva granulométrica da bentonite sódica utilizada na calda ensaiada [15]	38
Figura 3.2 – Misturadora de calda utilizada [15].....	39
Figura 3.3 – Cone de Marsh utilizado no ensaio [15]	41
Figura 3.4 – Ensaio de compressão simples [15].....	44
Figura 3.5 – Provetes utilizados no ensaio de flexão [15]	44
Figura 3.6 – Provete de placa circular ensaiado [15]	45
Figura 3.7 – Curva força-deslocamento a meio vão do ensaio de placa circular com modo de rotura determinado	45
Figura 4.1– Demonstração e esquema do ensaio Brasileiro [24].....	49
Figura 4.2 – Pontos de carregamento em vigas EFNARC [10]	50
Figura 4.3 – Curva força-deslocamento com representação da tenacidade T_b [24] .	50
Figura 4.4 – Viga carregada a meio-vão proposta por Bernard [24].....	51
Figura 4.5 – Representação Ensaio de Barcelona [24]	52
Figura 4.6– Ensaio de Barcelona e superfície de rotura habitual [24]	53
Figura 4.7 – Superfície de rotura do ensaio de Barcelona [24]	53
Figura 4.8 – Ensaio EFNARC em placas [12]	54
Figura 4.9 – Rotura de Painel Circular com Modo de Rotura Imposto em três segmentos [11].....	56
Figura 4.10 – Esquema de Placa com Modo de Rotura Imposto [24]	59
Figura 4.11 – Demonstração das condições de apoio e de medição dos deslocamentos [15]	59
Figura 4.12 – Configuração do ensaio de Placa Circular com Modo de Apoio Determinado [15].....	60
Figura 4.13 - Configuração de rotura de placa circular com modo de rotura imposto	60

Figura 4.14 – Parcela representativa das condições de apoio de uma placa de modo de apoio determinado	61
Figura 4.15 – Elementos finitos Solid65 [2].....	62
Figura 4.16 – Curva tensão-deformação do material sólido tipo betão [6].....	63
Figura 4.17 – Exemplo de curva tensão-deformação à compressão uniaxial [6].....	65
Figura 4.18 - Superfície de cedência definida para os elementos Solid65 [2]	65
Figura 4.19 – Representação do Modelo de Placa Circular Simplesmente Apoiada [5]	67
Figura 4.20 – Malha escolhida para o modelo de uma placa circular simplesmente apoiada	69
Figura 4.21 – Resultado da curva força-deslocamento do modelo em ANSYS.....	70
Figura 4.22 – Resultado da curva de força-deslocamento do modelo em ABAQUS [4]	70
Figura 4.23 – Curva força-deslocamento de placa circular com modo de rotura imposto ensaiada no LNEC	71
Figura 4.24 – Curva força-deslocamento da fase elástica da placa com modo de rotura imposto ensaiada no LNEC	72
Figura 4.25 – Curva força-deslocamento da primeira iteração do modelo de uma placa circular com modo de rotura imposto	73
Figura 4.26 – Curva força-deslocamento da segunda iteração do modelo de uma placa circular com modo de rotura imposto	74
Figura 4.27 – Curva força-deslocamento da terceira iteração do modelo de uma placa circular com modo de rotura imposto	75
Figura 4.28 – Curvas força-deslocamento ensaiada e do modelo	75
Figura 5.1 – Curva característica de um túnel [24]	78
Figura 5.2 – Representação da zona de plastificação do terreno [17].....	78
Figura 5.3 – Curva característica representativa com indicação da pressão de plastificação	79
Figura 5.4 – Geometria do túnel com indicação dos estratos existentes	82
Figura 5.5– Geometria do furo para simulação do túnel por de aplicação de pressão normal.....	82
Figura 5.6 – Bacias de subsidência considerando os diversos valores de contracção do túnel: (a) sem Areia 3, (b) com Areia 3	84
Figura 5.7 – Gráficos contracção vs. Área de subsidência: (a) sem Areia 3, (b) com Areia 3	85

Figura 5.8 – Isolinhas de deslocamentos verticais para modelo sem Areia 3 e para as contracções: (a) 0,5% e (b) 1,0%	86
Figura 5.9 – Isolinhas de deslocamentos verticais para modelo com Areia 3 e para as contracções:	87
(a) 0,5% e (b) 1,0%	87
Figura 5.10 – Vectores de deslocamentos verticais para modelo sem Areia 3 e para as contracções: (a) 0,5% e (b) 1,0%	88
Figura 5.11 – Vectores de deslocamentos verticais para modelo com Areia 3 e para as contracções: (a) 0,5% e (b) 1,0%	89
Figura 5.12 – Esforço axial no revestimento do túnel para o modelo sem Areia 3 e para contracções de (a) 0,5% e (b) 1,0 %.....	90
Figura 5.13 – Esforço axial no revestimento do túnel para o modelo com Areia 3 e para contracções de (a) 0,5% e (b) 1,0 %.....	90
Figura 5.14 – Momento flector no revestimento do túnel para o modelo sem Areia 3 e para contracções de (a) 0,5% e (b) 1,0 %.....	91
Figura 5.15 – Momento flector no revestimento do túnel para o modelo com Areia 3 e para contracções de (a) 0,5% e (b) 1,0 %.....	91
Figura 5.16 – Bacias de subsidência em função da pressão aplicada no túnel para o modelo sem Areia 3	93
Figura 5.17 – Curvas de pressão aplicada no túnel vs. Área de subsidência para o modelo sem Areia 3	93
Figura 5.18 – Curvas pressão aplicada no túnel vs. deslocamento vertical à superfície sobre o eixo do túnel para o modelo sem Areia 3.....	94
Figura 5.19 – Plastificação do terreno para a pressão (a) 130kPa; (b) 150kPa e (c) 180kPa	96
Figura 5.20 – Bacias de subsidência para a pressão aplicada no arco para o modelo: (a) sem Areia 3 e (b) com Areia 3	98
Figura 5.21 - Curva pressão aplicada no arco vs. deslocamentos verticais à superfície sobre o eixo do túnel para o modelo: (a) sem Areia 3 e (b) com Areia 3 ..	99
Figura 5.22 - Curvas de pressão aplicada no arco vs. área de subsidência para o modelo: (a) sem Areia 3 e (b) com Areia 3.....	100
Figura 5.23 – Bacias de subsidência para as várias fases de cálculo.....	101
Figura 5.24 – Deslocamento superficial sobre o eixo do túnel e deslocamento do coroamento do túnel vs. fase de cálculo	102
Figura 5.25 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 5.....	102

Figura 5.26 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 5	103
Figura 5.27 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 11	103
Figura 5.28 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 11	104
Figura 5.29 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 15	104
Figura 5.30 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 15	105
Figura 5.31 – Bacias de subsidência para as várias fases de cálculo	106
Figura 5.32 – Deslocamento superficial sobre o eixo do túnel e deslocamento do coroamento do túnel vs. fase de cálculo.....	107
Figura 5.33 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 5	107
Figura 5.34 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 5	108
Figura 5.35 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 11	108
Figura 5.36 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 11	109
Figura 5.37 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 16	109
Figura 5.38 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 16	110

Índice de Quadros

Quadro 1.1 – Parâmetros que definem as caldas antes e após a presa [7].....	10
Quadro 1.2 – Relação entre a técnica de injeção e solo a tratar [7]	14
Quadro 2.1– Misturadoras em função do tipo de calda [3].....	21
Quadro 2.2 – Ensaio de controlo das caldas segundo a sua caracterização [3] e [7]	21
Quadro 2.3 – Ensaio de controlo das caldas segundo a sua caracterização [3]	22
Quadro 2.4 - Objectivos para a aplicação de cada técnica de injeção [3]	25
Quadro 3.1 – Tipo de caldas para rochas fissuradas [3]	36
Quadro 3.2 – Aplicabilidade de cada tipo de calda em função do objectivo de melhoramento [3]	36
Quadro 3.3 – Distribuição granulométrica da bentonite sódica utilizada na calda ensaiada [15].....	38
Quadro 3.4 – Ensaio realizados e as suas normas e resultados.....	40
Quadro 3.5 – Resultados do ensaio de compressão simples da calda	43
Quadro 3.6 – Resultados do ensaio à flexão da calda	44
Quadro 3.7 – Resultados do ensaio da placa circular com modo de rotura determinado	46
Quadro 4.1 – Coeficientes de variação dos resultados obtidos para todos os provetes [4].....	57
Quadro 4.2 – Pontos definidores da curva extensão-tensão em compressão	68
Quadro 4.3 – Erros associados à modelação numérica comparativamente com os resultados práticos	76
Quadro 5.1 – Propriedades do terreno.....	81
Quadro 5.2 – Propriedades do revestimento do túnel.....	82
Quadro 5.4 – Assentamentos superficiais nos vários pontos de medida para as contrações 0.125, 0.25, 0.5 e 1%: (a) sem Areia 3; (b) com Areia 3	84
Quadro 5.5 – Assentamentos superficiais nos vários pontos de medida para as diversas pressões aplicadas no túnel.....	92
Quadro 5.6 - Assentamentos superficiais nos vários pontos de medida para as diversas pressões aplicadas no arco para o modelo: (a) sem Areia 3 e (b) com Areia 3	97

Quadro 5.7 – Deslocamentos superficiais com indicação das fases de cálculo 101

Quadro 5.8 – Deslocamentos superficiais com indicação das fases de cálculo 106

Introdução

Este trabalho baseia-se na caracterização física e mecânica de uma calda de cimento-bentonite, de forma a possibilitar prever o seu comportamento quando aplicada como material de injeção para melhoramento dos terrenos. Como tal, esta Dissertação engloba desde a descrição e bases das técnicas de injeção, ao equipamento utilizado para esse efeito, a caracterização da calda de injeção, e finalmente o seu contributo após aplicação.

No Capítulo 1 apresentam-se os conceitos fundamentais da injeção de caldas nos terrenos, identificando o processo, através da descrição dos seus campos de aplicação e adequabilidade de utilização. Descrevem-se ainda neste capítulo os materiais constituintes das caldas e a informação relevante para que sejam alcançados os objectivos da obra.

No Capítulo 2 aborda-se o equipamento utilizado num trabalho de injeção e as suas técnicas fundamentais. Para o sucesso de uma obra deste tipo é necessário utilizar o equipamento adequado, como são exemplos o equipamento de furação e mistura, portanto neste capítulo são indicados os equipamentos habitualmente utilizados ao longo de todo o processo. As técnicas fundamentais dependem do objectivo do tratamento e do tipo de terreno a tratar pelo que no capítulo 2, são desenvolvidos estes assuntos.

O Capítulo 3 refere-se à caracterização de uma calda de cimento-bentonite com base em ensaios realizados no LNEC.

O Capítulo 4 baseia-se especialmente na caracterização da calda de cimento-bentonite em relação à resistência à tracção, através da modelação numérica de exemplos existentes na literatura e nos ensaios descritos no Capítulo 3.

Por fim, no Capítulo 5 é simulada a injeção de calda num terreno arenoso durante a escavação de um túnel, através de um modelo numérico. Da criação deste modelo é possível avaliar o comportamento do terreno durante um projecto de injeção aplicado a um caso corrente de utilização.

1. CONCEITOS FUNDAMENTAIS

1.1. Definição e Objectivos da Injecção de Calda

A injecção de calda pode ser definida como o processo de injecção controlada de material, inicialmente em fase líquida temporária, no solo ou nas diáclases de rocha, onde endurece melhorando as características destes solos por necessidades de natureza geotécnica. Esta injecção é indirectamente controlada pelo ajuste das características reológicas da calda e pela manipulação dos parâmetros de injecção (pressão, volume e caudal).

A aplicação da calda e a sua adequabilidade a cada utilização concreta devem ser estudadas, dado que a sua má aplicação pode produzir danos nas estruturas vizinhas, ou causar danos ambientais como a contaminação do solo.

Deve ser adoptada uma abordagem observacional ao longo de todo o processo de tratamento, permitindo que os dados de dimensionamento inicialmente definidos, possam ser alterados no decorrer dos trabalhos. Este processo pode assim ser definido como um processo iterativo, com vista à melhoria dos resultados obtidos.

O leque de aplicações de cada tipo de calda e técnica de injecção é limitado, daí que dada a heterogeneidade do solo, possa ser necessário recorrer a uma combinação de várias técnicas e/ou tipos de calda.

A utilização do processo de injecção de calda tornou-se mais usual nos últimos anos devido à necessidade de maior controlo do comportamento do solo em zonas urbanas dada a sua “sobre-utilização”, e devido à maior necessidade de desenvolvimento de estruturas subterrâneas nestes locais.

Os principais objectivos geotécnicos da utilização desta técnica são:

- modificação das características hidráulicas/hidrogeológicas do solo;
- alteração das propriedades mecânicas do solo;
- preenchimento de cavidades naturais, minas e vazios adjacentes a estruturas;
- indução de deslocamentos para compensar pela perda de solo ou estabilização e elevação de sapatas, lajes e pavimentos.

Mais especificamente pode ser aplicado quando se pretende:

- reduzir a permeabilidade da massa de solo;
- formar uma barreira para fluxo de água ou de contaminantes no solo;
- fortalecer o solo para melhorar a resposta das fundações;
- fortalecer os solos para melhorar a estabilidade de escavações, e particularmente estabilizar a base destas;
- densificar os solos para prevenir a liquefacção;
- elevar estruturas ou pavimentos;
- sustentar estruturas;
- estabilizar o solo para facilitar a escavação de túneis ou poços.

1.2. Avaliação da Injectabilidade e Avaliação do Risco

Deve ser avaliada a possibilidade de utilização do processo de injeção de calda em cada caso de solo a reforçar, dado que esta técnica pode não ser conveniente em todas as situações.

Para avaliar a adequação da utilização do processo e formular o dimensionamento de um trabalho de injeção, há aspectos a ter em consideração, como:

- definir os objectivos da aplicação da calda e dos critérios de controlo;
- adequar imediatamente a informação do solo local, em particular a permeabilidade *in-situ*, e os dados geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos para a injeção;
- identificar limitações impostas por considerações ambientais, a influência das ou nas estruturas adjacentes (edifícios, fundações e túneis) ou quaisquer outros parâmetros que podem afectar a escolha das mistura e técnica de aplicação;
- ter em consideração outros projectos de injeção de calda executados na mesma área ou em circunstâncias comparáveis.

Com base nos parâmetros acima descritos, pode obter-se uma informação preliminar para a injeção da calda que permite avaliar se esta técnica é adequada, perante os objectivos propostos e as características do terreno.

A utilização da técnica de injeção de calda pode envolver alguns riscos relacionados com o impacto ambiental e a introdução de esforços e deformações no solo que podem afectar estruturas existentes.

No que diz respeito à avaliação de risco de impacto ambiental, deve ter-se em conta a poluição do solo devido à limpeza do equipamento utilizado, a utilização de caldas constituídas por produtos químicos contaminantes e a degradação da calda a longo prazo, quando sujeita a intempéries agressivas e que podem libertar produtos químicos para as águas subterrâneas. Para uma avaliação do risco de impacto ambiental, devem ser tomadas assim precauções prévias à decisão da injeção da calda. Estas precauções podem ser sustentadas pela obtenção de informação relacionada com as condições existentes, com particular atenção para as condições das águas subterrâneas, como a sua direcção e velocidade e deve ainda ser tomado em consideração os efeitos esperados e a sua duração (efeitos poluidores e quantificação desses efeitos).

Em relação ao risco relacionado com o acesso ou a proximidade de pessoas à obra, devem ser consideradas as medidas de segurança necessárias para sua salvaguarda. Deve ainda ser utilizado material e vestuário de segurança, dada a toxicidade de alguns materiais.

1.3. Metodologia

O projecto de injeção de calda deve seguir uma metodologia que abreviadamente, pode ser descrita pelos seguintes passos gerais, segundo [7]:

- definição dos critérios de dimensionamento e objectivos do programa de injeção da calda;
- ensaios de injectabilidade e onde apropriado, ensaios de campo;
- definição do tipo de caldas, materiais e preparação;
- aplicação da calda;
- supervisão, monitorização e controlo (incluindo reavaliação dos objectivos e do critério ao longo dos trabalhos).

1.4. Critérios de Dimensionamento e Apreciação do Local de Aplicação

Os objectivos da aplicação da técnica de injeção de calda, devem ser de imediato definidos antes do dimensionamento do projecto. Os aspectos mais importantes para o dimensionamento são:

- características físicas e área do terreno a ser tratado;
- composição da mistura e propriedades mensuráveis para ser alcançado o período de vida do projecto;
- método de perfuração padrão;
- técnica de injeção de calda, processos de injeção e métodos a aplicar;
- espaçamento e sequência de injeção;
- limites permissíveis dos parâmetros de injeção (pressão de injeção, caudal e volume de calda a injectar);
- ensaios preliminares e de controlo;
- instrumentos de monitorização.

Para que o trabalho seja bem sucedido o tipo de calda, o processo de injeção e o equipamento a utilizar devem ser compatíveis com o tipo de terreno a tratar.

Quanto à apreciação do local onde o solo será tratado, deve ser recolhida informação geotécnica e hidrogeológica. Para efeitos de dimensionamento a prospecção do local deve:

- fornecer relatório com a informação geotécnica;
- estabelecer critério que permita a percepção da adequabilidade da técnica de injeção de calda;
- fornecer dados para a escolha do tipo de calda.

Existem diversas restrições locais, tais como estruturas vizinhas, fundações ou níveis freáticos que devem ser tidos em consideração na escolha da mistura e do processo de aplicação da calda.

Deve ser recolhida informação no local onde se pretende fazer a injeção e realizado um relatório com informação relevante, onde se especifique:

- características físicas e químicas do solo;
- cotas do solo em investigação e locais de ensaios relativos a pontos conhecidos;

- presença de zonas singulares (com forte anisotropia ou muito permeáveis) que possam influenciar os trabalhos de injeção da calda;
- orientação, frequência e abertura de diáclases em rochas e composição e natureza do material de preenchimento;
- presença de obstruções à perfuração que necessitem de equipamento específico;
- zonas instáveis do solo;
- níveis de água subterrânea e de gradientes hidráulicos ao longo do tempo;
- estratos com grandes caudais de água subterrânea;
- temperatura, composição química, e teores orgânicos e bacteriológicos da água subterrânea ou do solo, e influência expectável nos trabalhos de injeção.

Para a realização de trabalhos de injeção de caldas deve ser considerada uma abordagem observacional, para comparação dos resultados práticos com os critérios de dimensionamento assumidos.

1.5. Materiais e Produtos

1.5.1. Materiais das Caldas

Existem diversos materiais que podem constituir uma calda. As caldas são constituídas por materiais que podem ser divididos em ligantes hidráulicos e cimentos, minerais de argila, areia, seixo e inertes, produtos químicos e adjuvantes, água e outros componentes. Estes constituintes de uma calda devem reagir bem entre si, bem como deve ser garantida a sua compatibilidade com o solo a tratar.

Os ligantes hidráulicos incluem todos os cimentos e produtos similares utilizados em suspensões aquosas. Existem ligantes hidráulicos que variam em termos de granulometria, sendo que os ligantes hidráulicos micro-finos são aqueles que se caracterizam pelo tamanho das partículas D_{95} menor que $20\mu\text{m}$. Na escolha de um ligante hidráulico deve ser considerada a sua curva granulométrica, consoante o tamanho das fendas ou vazios a preencher.

Os minerais de argila são habitualmente utilizados em caldas de cimento para reduzir a segregação e a filtragem preferencial de certos constituintes sob pressão,

com o objectivo de alterar as propriedades reológicas da calda e para melhorar a sua estabilidade, pela variação da viscosidade e da coesão da calda. Devem ser determinados os minerais existentes, o tamanho das partículas, o teor em água e o limite de liquidez das argilas

As areias e outros inertes são utilizados com frequência nas caldas de cimento ou suspensões de argila como materiais de aumento de volume ou inertes, e para alterar a consistência, a resistência à segregação ou a resistência mecânica e a deformabilidade.

Os adjuvantes podem ser orgânicos ou inorgânicos. Estes materiais têm como objectivo modificar as propriedades das caldas e controlar parâmetros como a viscosidade, o tempo de cura, a resistência, a coesão e a permeabilidade após aplicação.

A água a utilizar deve ser testada (particularmente em relação a cloretos, sulfatos e matéria orgânica) e aprovada.

1.5.2. Caldas

As caldas podem ser classificadas como soluções, coloidais, suspensões, pastas e argamassas, por ordem crescente do tamanho das partículas que as constituem.

O tipo de calda deve ser escolhido considerando as propriedades intrínsecas:

- reologia (viscosidade, coesão, etc.), tempo de presa, estabilidade;
- tamanho das partículas, se aplicável;
- tensão e durabilidade;
- toxicidade.

As soluções na sua maioria não contêm partículas sólidas, contudo em alguns casos contêm impurezas. Estes compostos depois de atingirem presa transformam-se em gel, isto é, gelificam. As soluções puramente inorgânicas utilizadas em trabalhos de injeção de calda, são soluções aquosas de silicato de sódio e um reagente orgânico.

Deve ser dada especial atenção aos seguintes aspectos:

- toxicidade dos componentes individuais de resina da calda;
- risco de diluição da calda pelas águas subterrâneas levando ao prolongamento do tempo de presa ou mesmo à inibição da reacção química;

- toxicidade de qualquer substância libertada para a água subterrânea se a reacção química não é totalmente concluída ou é modificada pelo meio a tratar.

As suspensões apresentam partículas de maior dimensão do que as soluções e podem ser caracterizadas por:

- distribuição granulométrica das partículas sólidas;
- razão água/partículas sólidas;
- taxa de sedimentação e segregação;
- capacidade de retenção de água sob pressão de filtração;
- propriedades reológicas e comportamento ao longo do tempo.

A curva granulométrica deve ser determinada através da técnica de ensaio por difracção de raios laser e devem ser tidas em consideração a possibilidade de ocorrência de floculação (especialmente em suspensões micro-finas) e de assentamento da parte sólida quando em suspensão em água.

As pastas e as argamassas com grande atrito interno são utilizados no método de compactação de solos ou para preencher vazios. No caso da sua utilização para a técnica de compactação de solos, a calda deve ter pelo menos 15% de finos passados num peneiro de malha 0,1 mm. Este tipo de caldas pode ser utilizado para preencher vazios, fissuras largas e abrir fendas e espaços vazios em solos granulares através do seu peso próprio. O seu comportamento reológico pode ser controlado através de ensaios de trabalhabilidade.

Os principais parâmetros que definem as caldas antes e após atingirem presa, estão representados no Quadro 1.1 que se apresenta de seguida.

Quadro 1.1 – Parâmetros que definem as caldas antes e após a presa [7]

	Soluções	Suspensões	Argamassas
Antes da Presa	Tempo de presa, densidade, pH, Superfície específica, pot life, tempo de gelificação, viscosidade, coesão e tixotropia	Tempo de presa, densidade, pH, distribuição granulométrica, viscosidade, coesão, cedência, tixotropia, estabilidade, capacidade de retenção de água	Tempo de Presa, densidade, pH, distribuição granulométrica, viscosidade, trabalhabilidade, capacidade de retenção de água
Após a Presa	Tempo de cura, tensão final, pH, deformabilidade, durabilidade, retracção, expansão, resistência ao corte	Tempo de cura, tensão final, deformabilidade, durabilidade, retracção, expansão, densidade, resistência ao corte	Tempo de cura, tensão final, deformabilidade, durabilidade, retracção

Pot life é o período de tempo em que uma solução apresenta uma viscosidade suficientemente baixa, que permita a sua utilização sem perder as suas características intrínsecas.

O comportamento da calda pode ser influenciado pela temperatura, sendo necessário respeitar as indicações de aplicação, em especial neste aspecto.

A calda pode ser definida de várias formas, o que revela o vasto campo de aplicações deste material. Este material pode ter várias características, como a maior ou menor viscosidade, que dependem de factores como tamanho das fissuras ou vazios a preencher, características mecânicas a atingir, propriedades expansivas e custo.

1.5.3. Tipos de Calda – Caldas de Cimento

Existem diversos tipos de caldas, de entre os quais se destacam as caldas de cimento, de silicato e as resinas. No caso deste documento, apenas se aborda as caldas de cimento.

As caldas de cimento podem ser caracterizadas pela sua razão água/cimento e pela razão matéria seca/água. Estas caldas são utilizadas fundamentalmente para fortalecer os solos e para criar barreiras hidráulicas.

As principais vantagens deste tipo de calda são a sua estabilidade, durabilidade, facilidade de preparação e utilização, baixo custo e são constituídas por materiais amplamente disponíveis no mercado.

Estas caldas podem ser suspensões de cimento, caldas de cimento-argila/bentonite, caldas com inertes e caldas de cimento especiais.

As caldas de suspensões de cimento são instáveis, ou aquando da utilização de aditivos químicos, estáveis ou semi-estáveis e apresentam, tipicamente, uma razão água/cimento compreendida entre 1 e 2,5.

As caldas de cimento-argila/bentonite são suspensões estáveis, e a adição de bentonite ao cimento permite alterar a viscosidade e a coesão da calda.

Quanto às caldas de cimento especiais, podem ser caldas com melhoria na penetração, resistência mecânica e resistência à segregação. Podem também ser caldas de presa rápida com endurecimento controlado, caldas em espuma, caldas expansivas ou gaseificadas. As caldas de presa rápida são obtidas através de aditivos. O volume das caldas expansivas pode atingir o dobro do seu valor inicial, e processa-se após a injeção da calda, sendo obtido através da libertação de hidrogénio pela calda. Já o volume das caldas gaseificadas pode atingir cerca de metade do volume inicial, através da adição de ar à mistura através de um agente saturado.

A estabilidade de uma calda é levada em consideração com o objectivo de evitar a sedimentação ou segregação do cimento durante a aplicação desta, reduzir as perdas de água, aumentar o tempo de presa, melhorar a penetração em solos consolidados e obter uma mistura coloidal homogénea com vasta gama de propriedades reológicas.

A penetrabilidade é importante nas caldas, dada a variedade de tamanhos das fissuras ou vazios a preencher. Para obter uma melhor penetrabilidade para preencher vazios pequenos ou fissuras estreitas, na preparação das caldas devem ser utilizados materiais com partículas de menores dimensões, utilizar aditivos para reduzir a viscosidade e aumentar a resistência aos efeitos de filtração pela utilização de agentes dispersores, para dispersar os grãos da calda, e polímeros de retenção de água em água intergranular.

1.5.4. Dimensionamento da Mistura e Ensaios

A mistura da calda é uma fase importante do processo de tratamento, dado que a sua qualidade é um elemento fundamental para alcançar os objectivos propostos.

A escolha da mistura é uma etapa fulcral que depende de factores como:

- objectivo do tratamento;
- condições do solo ou rocha;
- compatibilidade dos materiais constituintes da calda;
- aplicação, tempo e sequência das injeções;
- propriedades reológicas da calda;
- tempo de presa e de cura;
- propriedades físicas após a presa;
- efeitos degradativos;
- tamanho dos vazios a preencher;
- permeabilidade do meio e penetrabilidade da calda;
- temperatura *in-situ*;
- toxicidade dos constituintes.

Devem ser levados a cabo ensaios tanto dos materiais constituintes de uma calda como à própria mistura, para confirmação da aderência dos parâmetros reais aos parâmetros de dimensionamento.

A temperatura ambiente indicada para os ensaios laboratoriais das caldas é de 20°C, ou nas condições mais próximas possíveis do ambiente *in-situ*.

1.6. Aplicação da Calda

A aplicação da calda é feita por meio de injeção e é caracterizada pelo volume de calda injectado numa fase sem interrupções V , pressão de injeção P , o caudal Q e as características reológicas da calda.

Podem ser feitos ensaios de campo, para escolher a pressão de injeção mais adequada, visto existir a possibilidade de ocorrência de deformações e deslocamentos do solo indesejáveis, no caso dos parâmetros de injeção (pressão, volume e caudal) não serem escolhidos convenientemente.

O método de injeção da calda é escolhido tendo em conta certos parâmetros, como as condições do solo, requisitos do projecto e tipos de calda disponíveis. Os métodos de injeção da calda mais comuns são os seguintes:

- injeção faseada, em furos não sustentados, em solo estável (furo aberto);
- injeção através de tube-à-manchette ou tubo coador, colocado num furo previamente sustentado;
- injeção através da ponta do obturador, em solo instável, geralmente considerada como uma pré-fase do processo de injeção e seguida pelo método descrito acima;
- injeção de calda pelo método de compactação do solo, habitualmente através de encamisamento colocado durante a injeção da calda por fases ascendentes.

O processo de injeção com uma única fase habitualmente não é aplicável a solo com variações em profundidade (heterogeneidade).

Para a injeção sequencial ascendente, o furo é aberto até à sua profundidade total e depois a aplicação da calda decorre por fases a partir do fundo do furo. Para este tipo de injeção pode ser utilizado um obturador no topo de cada fase ou um obturador duplo em que a distância entre cada um deles equivale ao comprimento de injeção de cada uma das fases. A injeção sequencial ascendente é utilizada apenas em rocha (estável ou instável) e se a técnica de injeção a utilizar for a técnica de compactação do solo, pode também ser utilizada em solo estável.

A injeção sequencial descendente é uma técnica em que o furo onde é injectada a calda é feito em pequenas etapas. Em cada etapa a calda é aplicada abaixo de um obturador colocado no topo dessa, antes da perfuração da fase seguinte. Esta técnica é utilizada no tratamento de rochas instáveis em que os obturadores não podem ser facilmente selados.

A injeção múltipla, utilizando tube-à-manchette, é habitualmente utilizada em solos e por vezes em rocha instável, onde os obturadores não podem ser facilmente selados. O Quadro 1.2 apresenta a relação entre as técnicas de injeção a aplicar, com o tipo de solo a tratar.

Quadro 1.2 – Relação entre a técnica de injeção e solo a tratar [7]

	Rocha	Rocha	Rocha	Rocha	Solo	Solo	Solo
Estado do solo	Estável	Instável	Instável	Instável	Estável	Instável	Instável
Técnica de aplicação	Furo aberto	Furo aberto	Tube-à-manchette	Haste da Broca	Haste da Broca	Tube-à-manchette	Encamisamento
Processo de uma fase (<i>single-stage</i>)							
Fases ascendentes (<i>Ascending-stage</i>)							
Fases descendentes (<i>Descending-stage</i>)							
Muti-fase (<i>Multi-stage</i>)							

1.6.1. Sistema de Furação e Limpeza

Os furos em que será aplicada a calda podem ser feitos através de:

- furação rotativa;
- furação à roto-percussão utilizando um martelo externo ou de fundo do furo;
- furação à roto-percussão revestida (sistema duplex);
- varas conduzidas;
- sondagens com grampo, cinzel e balde (ferramenta de cabo).

Em solos instáveis o furo pode necessitar de sustentação temporária (habitualmente instalada pelo método de perfuração duplex), inserção directa de tube-à-manchette, da utilização de caldas ou espumas ou de estabilização progressiva do furo conforme a perfuração vai avançando.

Existem várias formas de limpeza do furo, como a utilização de ar, água, espumas ou caldas. O sistema de limpeza não reduz a permeabilidade do solo em redor do furo mas reduz a capacidade de injeção de calda. Após a perfuração em rocha, o furo deve ser limpo de forma a remover as partículas de material residual.

1.6.2. Furação Padrão e Dimensionamento do Furo

Os furos onde se irá injectar a calda devem ser dimensionados, de forma a conseguir atingir os objectivos de menor custo e maior eficácia possíveis.

A posição relativa dos pontos de injeção na área de terreno a ser tratado depende:

- da geometria da zona a tratar;
- de restrições físicas que influenciam a posição dos furos;
- de tolerâncias direccionais expectáveis do furo;
- da avaliação do raio de efeito expectável da calda.

As características dos furos e dos pontos de injeção – posição, número, diâmetro, profundidade, inclinação e orientação – dependem de características geológicas, do tipo de estrutura a tratar, da escala de trabalhos, dos objectivos a alcançar, do método e propósito da injeção, do tipo e da quantidade de calda a utilizar e da pressão de injeção.

No caso da injeção de calda em rochas deve ser tomada em consideração a orientação e localização das fissuras ou descontinuidades a preencher, de modo a que o furo as intercepte segundo um ângulo óptimo.

O diâmetro do furo normalmente é escolhido tendo em conta a sua profundidade e inclinação e o tipo e condição da rocha a tratar. Este diâmetro deve também ter em conta a possibilidade de fazer ensaios no seu interior.

1.6.3. Sequência de Injeção da Calda

A sequência da injeção da calda deve ser feita por múltiplas etapas, sendo que cada etapa implica a aplicação de calda do mesmo tipo ou de diferentes tipos em vários furos.

O dimensionamento deve especificar as seguintes variáveis:

- a forma como o tratamento vai progredir na área a tratar (para dentro ou para fora, descendente ou ascendente, etc.);
- a possível introdução de uma fase secundária ou sucessivas fases de injeção (período de actividade de aplicação, geralmente seguida por uma avaliação dos resultados);

- o número de injeções por fase (o comprimento do furo injectado de uma vez);
- o tipo de calda introduzida por cada injeção de um dado comprimento de furo sem interrupção.

Para a injeção da calda em rochas, a sua aplicação deve ser feita em furos primários, seguido dos secundários e depois dos terciários, de modo a obter uma aplicação uniforme, permitindo a injeção completa das diáclases.

O espaçamento dos furos primários deve ser escolhido com base na experiência ou em ensaios prévios. Para limitar a migração de calda para fora da área a tratar, a injeção deve iniciar-se na zona mais periférica e ir evoluindo para a zona mais interior.

1.6.4. Pressão de Injecção

A pressão de injeção da calda pode ser medida na bomba de entrega ou no topo do furo.

Quanto maior a pressão de bombagem maior será a taxa de penetração, portanto para caldas mais viscosas ou maiores comprimentos de zonas a tratar a pressão terá de ser maior que noutros casos.

A pressão efectiva de injeção em rochas, está relacionada com a pressão a que a rocha rompe sob tensão ou ocorre o aumento das fissuras tratadas.

A pressão de injeção permitida é a pressão máxima permitida de ser introduzida num meio de forma a evitar deformações indesejáveis desse meio.

Na injeção de calda em solos sem deslocamento ou substituição, a pressão de injeção de dimensionamento deve ser escolhida através de observação e dados de campo.

1.7. Supervisão, Monitorização e Controlo

Deve ser estabelecido e especificado um critério de monitorização e controlo antes, durante e após o trabalho de injeção, e alguns dos parâmetros a serem monitorizados e controlados são:

- propriedades da calda durante a preparação e a aplicação;
- tolerâncias na direcção e inclinação dos furos a injectar;
- critério para conclusão de cada injeção sem interrupção;
- os resultados alcançados após cada fase de injeção e/ou no final do projecto;
- movimentos e deformações do solo;
- composição química da água;
- níveis de água em poços existentes e poços de observação.

Deve terminar-se a injeção de uma fase, no caso da ocorrência de:

- Em solos:
 - ser atingido o limite de pressão e/ou o volume a injectar;
 - movimento excessivo do terreno;
 - escape de calda à superfície, para edifícios ou furos vizinhos;
 - extravasão de calda (efeito *bypass*) através dos obturadores
- Em rochas:
 - ser atingido o limite de pressão e/ou o volume a injectar;
 - movimento do solo;
 - escape de calda;
 - perda inaceitável de calda para zonas adjacentes.

A supervisão deve ser feita por representantes experientes e adequados, e ao longo de todo o processo de execução. Os processos e resultados observados devem seguir o estabelecido no dimensionamento. Para tal, e para facilitar a observação de resultados deve ser utilizado um sistema computadorizado, e no caso dos resultados diferirem dos expectáveis, deve ser analisada a causa do erro.

2. EQUIPAMENTOS E TÉCNICAS FUNDAMENTAIS

Num trabalho de injeção de calda são necessários diversos equipamentos: instrumentos de perfuração e condução, mistura e preparação da calda, bombagem e recepção, injeção e aplicação, e de monitorização, teste e controlo. Todo o equipamento deve ser compatível com a técnica de injeção a utilizar.

Existem seis técnicas fundamentais de injeção de calda – Permeação, Rocha, Compactação, *Jet*, Compensação e Fracturação Hidráulica.

Neste capítulo faz-se uma abordagem mais em detalhe dos equipamentos a utilizar num trabalho de injeção de calda e das técnicas de injeção referidas.

2.1. Equipamento

2.1.1. Perfuração

Os equipamentos de perfuração e condução podem ser compostos por sondas rotativas, de percussão ou uma combinação de ambas. De seguida apresentam-se algumas soluções:

- sonda rotativa (ver Figura 2.1);
- sonda por roto-percussão utilizando um martelo externo ou de fundo do furo;
- sonda por roto-percussão fechada (sistema duplex);
- varas conduzidas;
- sondagens com grampo, cinzel e balde (ferramenta de cabo);
- condução de tubo de encamisamento ou tubos furadores,

Durante a abertura do furo onde será aplicada a calda devem ser registados parâmetros como a taxa de penetração, pressão do fluido, caudal, velocidade de rotação, torque, peso no obturador e comprimento do furo.



Figura 2.1– Sonda rotativa

2.1.2. Mistura, Preparação da Calda e Ensaio de Controlo

Devido à sensibilidade à temperatura e humidade das componentes das caldas, é necessária alguma cautela na sua recepção e armazenagem.

Na escolha da quantidade de cada componente para a preparação da calda, as tolerâncias admissíveis para cada tipo de mistura devem estar estabelecidas, segundo certificação tecnicamente válida.

A mistura da calda tem como objectivo melhorar a sua homogeneidade e permitir obter as características pretendidas. No caso de se pretender uma calda com melhor penetrabilidade, por exemplo, deve ser utilizada uma misturadora de elevado rendimento de forma a reduzir o tamanho das partículas que a constituem. As caldas com curto tempo de presa devem ser misturadas o mais próximo possível do ponto de aplicação.

As caldas compostas por bentonite devem ser humedecidas antes da aplicação dos adjuvantes.

No caso de se pretender uma injeção sem interrupções, para caldas particuladas, deve ser colocado um tanque de armazenamento de calda entre a misturadora e a bomba de injeção. Este tanque deve ser mantido sob agitação regular para evitar a presa prematura da calda.

A escolha da misturadora depende dos materiais constituintes da calda, e pode ser resumida pelo Quadro 2.1. Na Figura 2.2 apresenta-se uma misturadora típica de caldas coloidais.

Quadro 2.1– Misturadoras em função do tipo de calda [3]

Misturadora	Materiais da Calda
Misturadoras ou turbo-misturadoras com rotações elevadas, de 1500 a 3000 rpm	Caldas de cimento Caldas de partículas ultra-finas
Bomba misturadora em circuito fechado com tanque de mistura <i>turbo-breaker</i>	Caldas preparadas em grandes quantidades
Misturadora de lâmina com velocidade de 30 a 200 rpm	Caldas químicas
Pistola de mistura	Resinas em pequenas quantidades



Figura 2.2 – Misturador de caldas coloidais

Nesta fase dos trabalhos devem ser desenvolvidos ensaios de controlo da calda, para verificar a sua qualidade e consistência. No Quadro 2.2 que se apresenta de seguida, estão indicados os ensaios que devem ser desenvolvidos ao longo do processo de mistura e preparação da calda, consoante a sua classificação.

Quadro 2.2 – Ensaios de controlo das caldas segundo a sua caracterização [3] e [7]

Suspensões	Caldas micro-finas	Soluções (caldas químicas)	Argamassas
Densidade	Densidade	Densidade	Densidade
Viscosidade pelo Cone de Marsh	Granulometria	Tempo de presa	Trabalhabilidade
Tempo de presa	Viscosidade	pH dos componentes	Razão água:sólido
Segregação	Segregação	Temperatura	
	Testes da coluna de areia		

2.1.3. Bombagem e Condução

O sistema de bombagem e condução da calda deve resistir à máxima pressão de bombagem com um factor de segurança elevado, e consoante a técnica de injeção a utilizar. Os tubos de condução da calda devem ter um diâmetro que permita grandes caudais, para evitar a desagregação dos seus componentes ou o aumento excessivo da sua viscosidade.

Na escolha das bombas de injeção também devem ser considerados o caudal e as pressões atingíveis, de forma a evitar fracturação hidráulica onde não se pretende a sua ocorrência.

As bombas de injeção devem ser escolhidas de acordo com o Quadro 2.3, em função do objectivo de tratamento.

Quadro 2.3 – Ensaio de controlo das caldas segundo a sua caracterização [3]

Tipo de bomba	Aplicação
Bomba centrífugadora <ul style="list-style-type: none"> • Caudal de 10 a 50 m³/h 	Injecção de grandes vazios sob baixa pressão com caldas emulsionadas ou argamassas
Bomba de Parafuso <ul style="list-style-type: none"> • Caudal 10 a 20 m³/h 	Injecção de grandes vazios sob baixa pressão com caldas emulsionadas ou argamassas
Bomba de Piston ou de Pressão <ul style="list-style-type: none"> • Caudal de 0,1 a 15 m³/h • Pressão de 0,5 a 10 MPa em caudal ajustável 	Bomba standard para injeção a pressão controlada de: <ul style="list-style-type: none"> • argamassas de areias finas (d<2mm); • Suspensões particuladas; • Soluções químicas; • Caldas de sílica
Bomba de Parafuso, caudal 0,1 a 1 m ³ /h	Injecção de caldas químicas
Bomba Dosável de Piston	Injecção de resina
Pistola	Para pequenos volumes, injeção localizada da maioria dos tipos de calda

2.1.4. Injecção e Aplicação

Nos métodos de injeção descritos no Capítulo 1, foi referida a utilização de obturadores. Os obturadores são instrumentos que permitem isolar uma parcela do solo que se pretende tratar e evitar a migração axial de calda ao longo do furo de

acesso. Estes podem ser colocados apenas no topo do furo (em que isolam a porção do furo subsequente ao obturador) ou podem ser colocados no topo e no fundo de uma zona onde se pretende injectar a calda, denominando-se o último de obturador duplo.

Os obturadores podem ser passivos (“topo do furo” e de parafuso), ou activos/expansivos por efeito mecânico ou pneumático.

Aquando da utilização de obturadores, deve ser instalado um sistema de limpeza para remover a calda que se escoar por extravasão através dos obturadores (efeito *bypass*). O comprimento mínimo entre obturadores é de aproximadamente 3 m e o máximo entre 5 e 10 m. Em algumas rochas a utilização deste instrumento é impraticável, dada a necessidade de espaço para a sua utilização.

A injeção da calda pode ser feita através de vários instrumentos, de onde se destaca a utilização da cabeça do obturador, tube-à-manchette e varas guiadas ou vibradas.

O tube-à-manchette é utilizado na injeção de calda em solos e é constituído por um tubo com pontos de injeção, igualmente espaçados e envolvidos por uma manga de borracha (manchette) que funciona como válvula de injeção, e por um sistema de obturadores duplo, como representado na Figura 2.3.

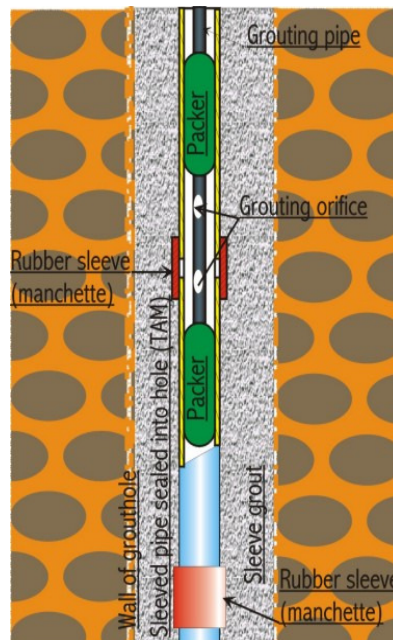


Figura 2.3 – Sistema de tube-à-manchette e obturador duplo

Este instrumento é aplicado no solo após a sua perfuração e sustentação por uma calda de cimento-bentonite, ou alternativamente por um material plástico de baixa resistência. As principais vantagens deste equipamento são a possibilidade de

proceder a re-injecções nos pontos de injeção, o furo de aplicação da calda manter-se estável ao longo da duração do trabalho e a injeção ser independente da perfuração do furo.

O sistema de injeção através da ponta do obturador é utilizado quando o fluido de perfuração utilizado é baseado em caldas de cimento. Este método tem como vantagem a possibilidade de injectar maiores caudais, tornando o tratamento menos moroso. No entanto, apresenta como desvantagens a injeção sem possibilidade de observação e a baixas pressões. Logo, em comparação com os outros métodos de injeção e em termos qualitativos, a injeção através da cabeça do obturador é, por vezes, menos vantajosa.

2.2. Técnicas Fundamentais

Tal como foi referido no início deste capítulo, existem seis técnicas fundamentais de injeção de calda na engenharia dos solos.

Estas técnicas de injeção podem implicar deslocamento ou substituição de parte do terreno. As técnicas de Permeação e de Injeção em Maciços Rochosos implicam o deslocamento ou substituição do terreno, ao passo que as restantes técnicas não implicam, como se mostra na Figura 2.4.

Cada técnica apresenta as suas especificidades, e por conseguinte cada uma delas tem os seus campos de aplicação, indicados no Quadro 2.4.

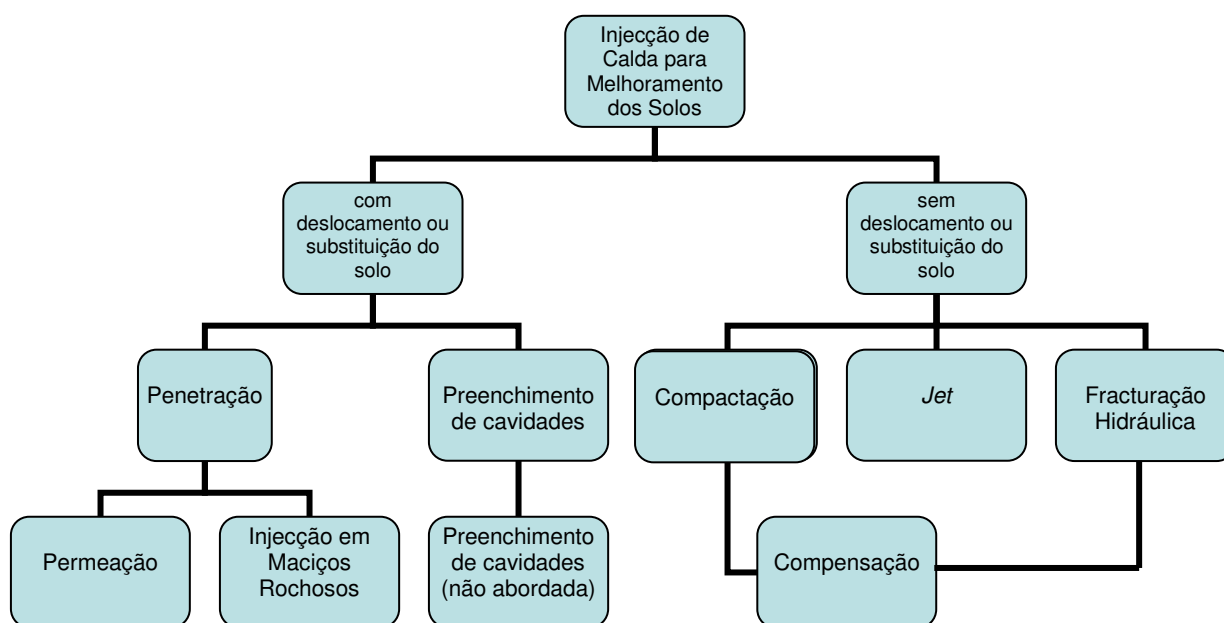


Figura 2.4 – Organização e caracterização das técnicas de injeção de calda para melhoramento de solos [3]

Quadro 2.4 - Objectivos para a aplicação de cada técnica de injeção [3]

Utilizações	Técnica de Injecção de Calda					
	Permeação	Rocha	Fracturação Hidráulica	Compactação	Jet	Compensação
Reduzir a permeabilidade da massa de solo						
Formar uma barreira ou corte para a água ou contaminantes no solo						
Fortalecer os solos para melhorar a resposta das fundações						
Fortalecer os solos para melhorar em particular a estabilidade da base de escavação						
Densificar os solos para prevenir a liquefacção						
Elevação de Estruturas ou pavimentos						
Sustentação de Estruturas						
Estabilização do solo para facilitar a construção de túneis ou de poços de escavação						
Mitigação das deformações do solo para a escavação de túneis, poços ou caves						

2.2.1. Injecções de Permeação

A técnica de Permeação baseia-se no preenchimento dos vazios presentes em solos permeáveis, pela calda a injectar.

Os principais objectivos desta técnica são a redução da permeabilidade do solo e controlar o fluxo de águas subterrâneas, mas pode também ser utilizada para aumentar a rigidez em solos granulares, e reduzir os contrastes de heterogeneidade. A principal vantagem da escolha deste método é a não destruição da estrutura do solo, e por conseguinte minimiza a perturbação nas estruturas e fundações adjacentes,

Esta técnica pode ser utilizada em conjunto com outras técnicas como a Fracturação Hidráulica, por exemplo, quando é necessário tratar zonas menos acessíveis do solo.

A técnica de Permeação é mais indicada para aplicação em areias limpas ou seixos, e o seu campo de aplicações abrange:

- construção de barreiras para prevenir a migração de água para as escavações;
- trabalhos de recuperação no núcleo de represas;
- redução dos assentamentos de estacas;
- construção de túneis e poços abaixo do nível freático em solos granulares.

A principal restrição à utilização desta técnica diz respeito ao bloqueio do fluxo de calda através do solo, pelo que deve ser tomada em consideração a viscosidade da calda, bem como a dimensão dos vazios do solo a tratar.

2.2.2. Injecções em Maciços Rochosos

A técnica de injeção da calda em maciços rochosos, na sua abordagem geral consiste no preenchimento de fissuras, juntas, descontinuidades e cavidades, com calda.

Os objectivos desta técnica são a redução da permeabilidade do maciço, pela extinção ou redução dos caminhos percorridos pela água; melhorar a rigidez das formações rochosas fracturadas, pela restrição dos seus movimentos e preencher as cavidades existentes.

Os campos de aplicação desta técnica são bastante vastos e dos principais destacam-se a construção de túneis, barragens, fundações profundas e outras subestruturas.

Quanto às limitações da aplicação desta técnica, no caso de ser utilizada de forma incorrecta ou menos cuidada, pode levar a durabilidade reduzida do tratamento por efeitos de erosão e actividades química e biológica. Para que o seu dimensionamento seja cuidado, devem ser conhecidas as características das descontinuidades bem como a sua direcção, abertura e espaçamento. As restantes limitações à aplicação desta técnica assentam na abertura das fendas, fissuras e descontinuidades que não deve ser menor que 0,5 mm, e a permeabilidade deve ser superior a 5×10^{-7} m/s [3].

2.2.3. Injecções de Compactação

A técnica de injeção de calda por Compactação do Solo pode ser caracterizada pelas técnicas de compactação, intrusão e compressão. Esta técnica consiste na injeção de calda espessa na massa de solo, formando bolbos ou corpos de calda, que permitem a compactação do solo, através do rearranjo das partículas.

A Compactação do Solo pode ser utilizada em todo o tipo de solos, particularmente os granulares e rochas muito fracturadas, e tem como objectivos a melhoria da estabilidade, da rigidez e da capacidade de carga da massa de solo tratada.

A técnica de Intrusão é uma combinação das técnicas de Compactação do Solo e de Fracturação Hidráulica. A calda a injectar deve ser espessa, viscosa e particulada. Esta técnica permite um efeito de compactação de algumas fracturas hidráulicas presentes no solo, devido às suas circunstâncias e às características reológicas da calda.

A técnica de injeção de calda de Compressão é levada a cabo através da injeção de uma calda moderadamente espessa e particulada, em fracturas naturais ou causadas por Fracturação Hidráulica. Esta técnica tem como objectivos compactar e consolidar o solo envolvente à zona tratada.

A Compressão é indicada para o tratamento de solos e rochas em que os vazios e fissuras apresentam características semelhantes às dos solos tratados pelas técnicas de Permeação e de injeção em maciços rochosos, respectivamente.

Podem ser tratadas pela técnica de Compactação do Solo, situações como a correcção de assentamentos, a prevenção da liquefacção e a compensação por assentamentos devido à construção de túneis em terrenos brandos.

No entanto, existem algumas limitações à aplicação desta técnica como a não apropriação da sua utilização em solos argilosos, devido aos deslocamentos causados durante a injeção, e os custos em relação a outras técnicas no caso do tratamento ser muito moroso, dada a necessidade de equipamento especial e de perfuração. Também deve ser considerada a possibilidade de ocorrência de fracturação hidráulica, no caso da mistura ou do método de injeção não serem bem escolhidos.

2.2.4. Jet Grouting

A técnica de Jet é baseada na erosão do solo através de jactos de água ou calda, em que são criadas colunas ou painéis de uma mistura de solo e calda. A calda pode ser imediatamente misturada, enquanto o solo é erodido, ou pode ser retirada essa parcela de solo e misturado com a calda, e posteriormente recolocado.

Dos principais objectivos desta técnica destacam-se a melhoria das características do solo, como a redução da permeabilidade ou o aumento da sua rigidez e a actuação como barreira para caudais de água subterrânea.

Os campos de aplicação são bastante variados, bem como o tipo de solos que podem ser tratados através do Jet que abrangem argilas moles e rijas, areias e solos estratificados. No campo de aplicações destacam-se a possibilidade de criar fundações para estruturas, reforçar fundações existentes, criar muros de suporte, estabilização de taludes e soluções de pré-suporte em túneis.

As principais vantagens da utilização do Jet são como já foi referido a variedade de solos que pode tratar, a necessidade de utilização de pouco equipamento e a possibilidade de utilização em zonas de acesso difícil ou limitado.

Como limitações do processo apresentam-se a possibilidade de ocorrência de empolamentos que podem danificar estruturas adjacentes, a grande quantidade de detritos produzidos e a possibilidade de ocorrência de fracturação hidráulica causada pelo bloqueio do fluxo de calda devido a esses detritos produzidos.

2.2.5. Injecções de Compensação

A técnica de injeção de calda de Compensação aplica um conjunto de outras técnicas – Fracturação Hidráulica, Permeação, Compactação do Solo e Intrusão. Esta técnica surge devido à necessidade de compensação pelas perdas de volume do solo, que causam assentamentos durante a construção de uma estrutura subterrânea ou escavação, devido ao alívio das tensões do solo na zona envolvente. Assim, esta técnica prevê a injeção de calda nas zonas de alívio de tensões ou entre estas zonas e a estrutura adjacente, compensando este alívio com a pressão exercida pelo solo tratado.

A perda de volume do solo é então compensada por pequenos movimentos de elevação. Esta compensação deve ser feita antes ou durante a fase em que a estrutura será afectada por essa perda.

A Compensação tem como principal objectivo evitar ou minimizar movimentos do solo, em especial nos casos da construção de estruturas subterrâneas, escavações e paredes de contenção.

O custo da utilização desta técnica em relação a outras técnicas que produzem o mesmo efeito é a sua principal limitação. A quantidade de pontos de injeção necessários é outra das suas grandes limitações, que pode pôr em risco a sua utilização. Trata-se, por isso, duma medida extrema, de último recurso.

2.2.6. Injecções de Fracturação Hidráulica

2.2.6.1. Princípios e Objectivos

A técnica de Fracturação Hidráulica baseia-se na injeção de calda ou água sob pressão, que vai criar fendas ou expandir outras já existentes antes de preenchê-las. A Fracturação Hidráulica pode também ser descrita como a criação de fendas no solo para alargar o acesso à calda a uma taxa controlada pela permeabilidade do solo.

As fendas criadas surgem na direcção da menor resistência do solo, habitualmente associada às maiores tensões principais, que representam zonas de descontinuidade (estratificação ou direcção de diáclases em rochas, por exemplo). Quanto às primeiras fendas, pode sugerir-se que se desenvolvem na direcção

enunciada, já para a previsão da direcção das seguintes há que ter em conta a alteração do estado de tensão do solo, provocado pelo preenchimento das primeiras. Para solos sobre-consolidados é habitual as fendas desenvolverem-se na direcção horizontal.

A heterogeneidade dos solos afecta a penetração da calda. A calda acede preferencialmente às zonas com maiores aberturas, deixando outras zonas sem tratamento. A Fracturação Hidráulica deve aceder a zonas mais permeáveis, afastadas do ponto de injeção, através da abertura das fendas por meio da própria técnica. Assim, o tratamento de solos heterogéneos reduz a sua permeabilidade geral, aumentando a sua rigidez.

2.2.6.2. Campos de Aplicação

Os solos mais indicados para a aplicação desta técnica de injeção são os solos finos granulares.

As mais importantes aplicações da Fracturação Hidráulica são aquando da necessidade de redução da permeabilidade do solo, redução ou extinção de assentamentos, recuperação do nível original das estruturas, criar acesso a zonas que podem ser permeáveis e compensação por movimentos devidos à construção de obras subterrâneas.

Durante a aplicação desta técnica ocorrem empolamentos, portanto esta pode ser utilizada para elevar estruturas e compensar pela perda de volume do solo – Compensação. No caso do tratamento com este objectivo, a Compensação só deve ser utilizada durante o início dos movimentos do solo, para que as estruturas existentes e a superfície do solo se mantenham no seu nível original.

As principais vantagens da Fracturação Hidráulica são o menor custo em relação a outras técnicas, dada a possibilidade de atingir maiores caudais e pressões de injeção e a possibilidade de causar empolamentos e movimentos controlados, que podem ser úteis no nivelamento de estruturas que sofreram assentamentos.

2.2.6.3. Limitações

Como limitações à utilização da Fracturação Hidráulica surgem as incertezas em relação à posição e direcção das fracturas provocadas, a dificuldade de previsão ou determinação da extensão e espessura da calda no interior das fissuras, a falta de controlo da extensão e frequência das fracturas hidráulicas.

Como meio de reduzir as incertezas e permitir estabelecer relações empíricas entre os parâmetros relevantes e as especificidades do local, devem ser levados a cabo ensaios e medições ao longo de todo o decorrer do projecto.

2.2.6.4. Sequência de Trabalhos e Informação Relevante

A sequência de trabalhos no local para um projecto de Fracturação Hidráulica, deve estar organizado da seguinte forma:

1. pesquisa preliminar de estruturas e níveis do solo;
2. instalação do sistema de injeção de calda;
3. ensaios de injeção;
4. fracturação hidráulica controlada (incluindo as iterações apropriadas);
5. avaliação final das estruturas e dos níveis do solo.

Deve ser assim recolhida alguma informação previamente à completa decisão da utilização e dimensionamento de um projecto de Fracturação Hidráulica, donde se destacam:

- características geológicas e parâmetros geotécnicos do local;
- permeabilidade do solo ou rocha;
- condições hidrogeológicas;
- assentamentos e deformações permissíveis das estruturas adjacentes ao local e subterrâneas;
- estruturas adjacentes, serviços e estruturas subterrâneas;
- acesso para equipamento no local.

2.2.6.5. Mistura

As misturas utilizadas neste tipo de trabalhos são caldas de cimento ou caldas químicas.

A viscosidade da calda é um parâmetro importante no que respeita ao dimensionamento da mistura. Caldas pouco viscosas originam fracturas hidráulicas mais estreitas, dada a dissipação de pressão ao longo da fenda, permitindo maior propagação. Caldas mais viscosas permitem o aumento das fendas maiores. Os adjuvantes de redução do teor em água, são benéficos em conjunto com um curto tempo de segregação, para reduzir o tempo entre fases de injeção e impedir que a calda se expanda para além da zona a tratar.

2.2.6.6. Equipamento

O equipamento de injeção utilizado habitualmente é o tube-à-manchette e um sistema de obturadores duplo. Estes instrumentos são os mais indicados para a utilização desta técnica, para qualquer tipo de condições do solo.

O tube-à-manchette deve ser de aço no caso da utilização de grandes pressões, em detrimento dos habituais tubos plásticos. O diâmetro do tubo deve ser maior no caso da injeção de caldas particuladas ou químicas, no sentido de reduzir a resistência nas suas paredes.

Os obturadores são selados através de ar ou água sob pressão, na porção de solo que se pretende tratar e inicia-se a injeção. A injeção decorre até à criação de fracturas hidráulicas, quando a pressão de injeção excede a tensão instalada no solo.

As bombas a utilizar devem permitir atingir pressões de injeção na ordem dos 400 a 6000 kPa.

2.2.6.7. Bases de Dimensionamento

No que respeita ao dimensionamento, este deve ser cuidado de forma a atingir os objectivos propostos através de investigação local, ensaios de campo e laboratoriais, eventual modelação numérica e avaliação do risco, antes, durante e após o decorrer

do projecto. Todos estes parâmetros prevêm o sucesso do projecto e obtenção de resultados que permitem a definição das limitações, avaliação dos resultados expectáveis e o nível de trabalhos do projecto.

O sistema de injeção de calda deve ser capaz de injectá-la à pressão requerida, no local pretendido.

Como referido anteriormente, a Fracturação Hidráulica causa empolamentos. No dimensionamento para a utilização desta técnica devem ser considerados parâmetros como a orientação das fendas e a tensão instalada, tendo em conta que o máximo valor de empolamento ocorre para fracturas aproximadamente horizontais em solos com tensão de recobrimento reduzida.

Devem ser efectuados ensaios como fase preliminar do dimensionamento, para avaliar e modificar parâmetros iniciais do projecto, e assim ajudar na selecção do equipamento, mistura, parâmetros de injeção, malha de furos e sequência de injeção.

Estes ensaios podem também ser considerados uma avaliação à adequabilidade da aplicação da Fracturação Hidráulica, em virtude das condições do solo e objectivos do projecto.

Malha de Pontos de Injecção

Na criação da malha de pontos de injeção, devem ser tomados em consideração o tipo de projecto, o método de injeção e o acesso a esses pontos.

A injeção pode ser feita a partir da superfície do terreno ou de poços de acesso, ou ainda no caso da existência de túneis, eventualmente a partir da frente. As opções da superfície do terreno e da frente de túneis são as mais económicas. No entanto, nem sempre são possíveis estas opções devido a condicionantes como o acesso, a profundidade de injeção ou a inexistência de estruturas subterrâneas

Quanto maior for a profundidade do ponto de injeção, mais controlados são os empolamentos à superfície, dado que esses serão menores se se considerar o mesmo volume de calda e pressão de injeção a diferentes profundidades. Os furos de injeção da calda devem ser verticais ou um pouco inclinados, devido à possível existência de fundações ou à inclinação de descontinuidades.

Estes furos têm habitualmente comprimentos entre os 20 e os 80 metros e devem ser feitos mais furos do que o mínimo requerido, dada a possibilidade de ocorrência de alguns erros e bloqueios em alguns furos que os tornam inutilizáveis.

Parâmetros de Injecção

Os solos na sua grande maioria são heterogéneos, pelo que se torna difícil a avaliação das pressões de injecção a utilizar. Assim, devem ser feitos ensaios de campo no decorrer do projecto, para avaliar as pressões de injecção mais indicadas para causar fracturação hidráulica, bem como os limites máximo e mínimo quanto a esse parâmetro. Em solos homogéneos a pressão de injecção pode ser escolhida tendo em consideração o estado de tensão do solo *in-situ*.

Após a criação de fracturas hidráulicas o caudal de injecção habitualmente aumenta para preencher essas fracturas. Para tal, retira-se a manga de borracha que envolve os pontos de injecção do tube-à-manchette para que a injecção possa prosseguir aliviando o tubo de injecção até que o processo esteja concluído. A bombagem termina quando um dos seguintes critérios é atingido:

- recusa de calda à máxima pressão permitida;
- ocorrência da mínima taxa de bombagem à máxima pressão permitida;
- volume de calda predeterminado é injectado.

Para a selecção do número de fases de injecção devem ser considerados os requisitos do projecto, as propriedades da calda, o estado de tensão do solo, os parâmetros de injecção e a malha de pontos de injecção.

3. Ensaaios de caracterização de uma calda de cimento-bentonite

Para a utilização de caldas de cimento-bentonite num trabalho de injeção é importante conhecer as suas características. O objectivo da injeção proposta mais adiante é a redução dos assentamentos à superfície, aquando da escavação de um túnel. Para a definição do modelo de cálculo que será desenvolvido é importante determinar as características resistentes do material.

As características de penetrabilidade e exsudação são importantes na determinação da adequabilidade de utilização deste tipo de calda.

Os resultados indicados adiante são os obtidos em ensaios realizados no LNEC no âmbito de um projecto de investigação sobre melhoramento de terrenos [15].

3.1. Caldas de cimento-bentonite

Às caldas de cimento referidas no capítulo 1 podem ser acrescentados materiais para melhoria de algumas propriedades. A bentonite associada a estas caldas aumenta a sua viscosidade, impedindo a sedimentação significativa durante o tempo de injeção, diminui a perda de água na injeção, melhora a penetrabilidade, aumenta a resistência à lavagem em terrenos saturados e com níveis freáticos variáveis e evita a desagregação dos constituintes das caldas quando sujeitas às pressões de injeção. Quanto à resistência mecânica, nas caldas de cimento-bentonite é inferior à mesma para as caldas de cimento.

As caldas de cimento-bentonite têm assim como principal objectivo a redução da permeabilidade dos terrenos, no entanto, para trabalhos em grandes áreas torna-se necessário garantir a estabilização da calda.

3.1.1. Penetrabilidade

As caldas de cimento-bentonite apresentam boa penetrabilidade em solos grossos e rochas, dada a sua maior viscosidade em relação às caldas de cimento (cf. Quadro 3.1). No Quadro 3.2 está descrito o tipo de calda a aplicar consoante o objectivo do melhoramento.

Quadro 3.1 – Tipo de caldas para rochas fissuradas [3]

Tipo e tamanho dos vazios	Tipo de calda
Vazios abertos	Caldas de cimento com inertes de granulometria extensa (seixos)
Fissuras moderadamente largas (60-200 mm)	Caldas de cimento expansivas Caldas com baixo tempo de presa
Fissuras moderadamente estreitas (20-60 mm)	Caldas de cimento com inertes finos (escórias, areias finas, inertes) Caldas com baixo tempo de presa Caldas de cimento expansivas Caldas de cimento-bentonite Espumas de poliuretano
Fissuras estreitas (1-10 mm)	Caldas de cimento puro ou de cimento-bentonite Espumas sintéticas Resinas
Fissuras muito estreitas (0,1-1,0 mm)	Caldas de penetrabilidade melhorada Caldas de cimento puro micro-finas ou ultra-finas Caldas de silicato Resinas acrílicas
Fissuras extremamente estreitas (<0,1 mm)	Caldas de minerais ultra-finos Soluções de silicato com baixa viscosidade Resinas acrílicas Resinas fenólicas

Quadro 3.2 – Aplicabilidade de cada tipo de calda em função do objectivo de melhoramento [3]

Caldas		Objectivo: Aumento de Rigidez (R) Ou Redução da Permeabilidade (P)	<div> <div>Aplicação normal</div> <div> <div>Possível aplicação (limitada pelo custo)</div> <div>Limitado pela toxicidade</div> </div> </div>							
Cimento		R								
Cimento-bentonite		P/R								
Calda com inertes Calda expansiva		P								
Argila e gel Bentonite desfloculada		P								
Caldas com penetrabilidade melhorada		P								
Emulsões betuminosas		R								
Sílica gel	Aumento de rigidez	Concentrada	R							
		Baixa viscosidade	R							
	Redução da permeabilidade	Concentrada	P							
		Baixa viscosidade	P							
Resinas	Acrílica	P								
	Fenólica	R								
Propriedades do terreno	Permeabilidade inicial k [m/s]		10 ⁻⁷	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	

3.1.2. Composição típica. Influência nos parâmetros reológicos

As caldas de cimento são habitualmente caracterizadas pela relação água/cimento. Para as caldas de cimento-bentonite esta relação é de 1 a 1,5 e a percentagem ponderal de bentonite relativa ao peso de cimento está compreendida entre 0,5 e 5%.

Os parâmetros reológicos (viscosidade, coesão, etc.) de uma calda também podem classificá-la.

3.1.3. Caracterização, controlo de qualidade e controlo de desempenho

A caracterização da calda é feita através de ensaios de caracterização do ponto de vista físico-químico, hidráulico e mecânico. O controlo de qualidade deve garantir que as propriedades das caldas se mantêm minimamente estáveis na fase de aplicação através do ensaio de algumas amostras do material.

Na fase de controlo de desempenho podem ser efectuadas escavações em redor da zona tratada para observação directa, ou indirectamente através de prospecção sísmica, ou ainda com ensaios de campo específicos.

3.2. Material ensaiado

O material ensaiado é uma calda de cimento-bentonite, com uma razão água/cimento/bentonite (A/C/B) 1:1:2%, em que 2% representa a fracção ponderal da massa de bentonite relativamente à massa de cimento. A água utilizada foi água da rede pública que é a mais representativa dos ensaios *in-situ*.

3.2.1. Componentes

Bentonite

A bentonite utilizada na calda ensaiada é uma bentonite sódica natural, proveniente de Madrás e Bujarat (Índia).

Esta bentonite apresenta a curva granulométrica representada na Figura 3.1, com base nos valores do Quadro 3.3, e os seus valores dos coeficientes de uniformidade (c_u) e de curvatura (c_c) são 1 e 7, respectivamente. Esta curva granulométrica foi obtida através do método da difracção de raios laser. A massa volúmica das partículas sólidas é de 2670kg/m^3 .

Quadro 3.3 – Distribuição granulométrica da bentonite sódica utilizada na calda ensaiada [15]

Dimensão [mm]	% Passada
0,001	25,6
0,003	52,9
0,007	70,5
0,010	76,9
0,014	81,1
0,024	88,8
0,038	93,1
0,054	96,1
0,074 (#200)	97,7
0,105 (#140)	98,8
0,177 (#80)	99,9
0,250 (#60)	100,0

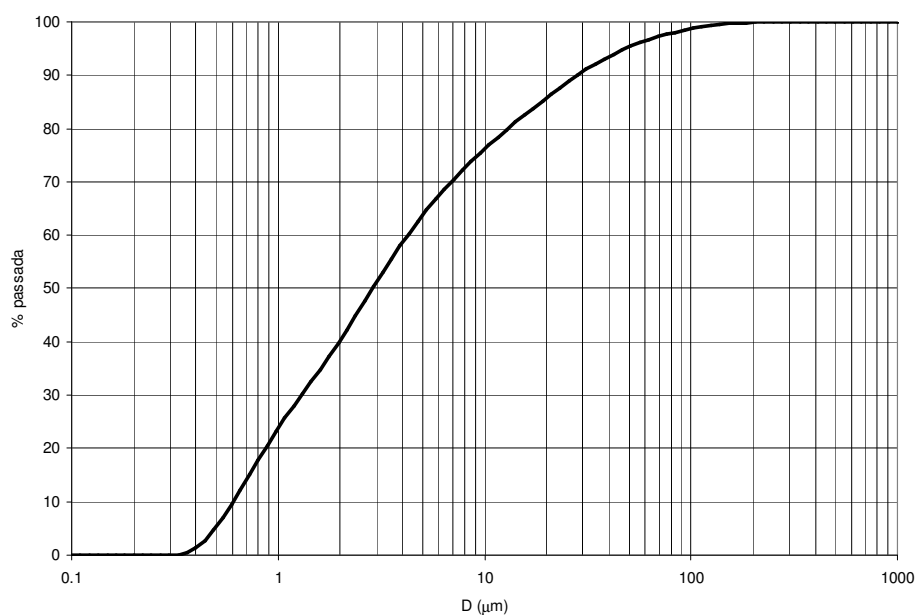


Figura 3.1 – Curva granulométrica da bentonite sódica utilizada na calda ensaiada [15]

Cimento

O cimento utilizado é designado por CEM IIB-L 32,5 N da CIMPOR, com os principais constituintes: $65 \leq \text{clínquer} \leq 79\%$. $21 \leq \text{calcário} \leq 35\%$ e sulfato de cálcio como regulador de presa.

Quanto às características mecânicas, apresenta uma resistência a compressão simples de 16MPa aos 7 dias e de 32,5MPa aos 28 dias.

3.2.2. Preparação da calda

A calda preparada apresenta uma razão água/cimento/bentonite (A/C/B) 1:1:2%, em que os 2% representa a fracção ponderal da massa de bentonite relativamente à massa de cimento.

A preparação da calda processa-se através de 2 fases principais: a hidratação completa da bentonite sódica e a mistura da bentonite hidratada com o cimento. A fase de hidratação completa da bentonite decorreu ao longo de 7 dias. A fase da mistura decorreu de forma a garantir a sua homogeneidade, sem grânulos, através da utilização de uma misturadora com dois excêntricos (exterior e interior), cf. Figura 3.2. O tempo de mistura foi de 1 minuto a uma velocidade de 24,7rpm e 58,5rpm, para o excêntrico exterior e interior da misturadora, respectivamente, e de 2 minutos para a fase seguinte de mistura a velocidades de 163,6rpm e 387,5rpm, para o excêntrico exterior e interior, respectivamente.



Figura 3.2 – Misturadora de calda utilizada [15]

Cada lote da mistura é constituído por 2000g de água, 2000g de cimento e 40g de bentonite, em que na primeira fase são utilizados 1900g de água e 40g de bentonite e na fase seguinte são adicionados os restantes 100g de água e 2000g de cimento.

3.3. Programa de ensaios

Os ensaios da calda de cimento-bentonite realizados em [15] que serão descritos mais adiante estão indicados no Quadro 3.4.

Quadro 3.4 – Ensaio realizados e as suas normas e resultados

Ensaio	Norma	Resultados
Fluidez (cone de Marsh)	NP EN 445	Tempo de escoamento (viscosidade aparente de uma calda)
Exsudação	NP EN 445	Percentagem de água que refluí à superfície da calda
Variação de volume	NP EN 445	Variação volumétrica da calda
Tempo de presa	-	Tempo de início e final de presa da calda
Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico	Rel. LNEC 427/05 - NRI	Módulo de elasticidade dinâmico da calda
Ensaio de resistência à compressão simples de provetes cilíndricos	NP EN 445	Obtenção da resistência à compressão de uma calda com diversas idades de cura, 7, 14, 28, 90 e 180 dias
Ensaio de resistência flexão	NP EN 445 NP 196-1	Resistência à flexão de uma calda
Ensaio indirecto à tracção – Placa circular com modo de rotura determinado	ASTM C1550-02	Resistência à tracção de uma calda

3.4. Ensaios correntes de caracterização da calda

3.4.1. Ensaio de fluidez (método do cone)

Este ensaio foi elaborado segundo a NP EN 445 de 2000 – “*Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio*”, e consiste na determinação do tempo que uma calda demora a escoar-se pelo bico de um cone de Marsh (cf. Figura 3.3) sob condições de ensaio normalizadas.



Figura 3.3 – Cone de Marsh utilizado no ensaio [15]

Os resultados deste ensaio revelam um valor de viscosidade aparente de 13,5s. De forma a avaliar a influência da utilização da bentonite na calda de cimento, utilizou-se a mesma razão água/cimento para efectuar o ensaio sobre uma calda sem bentonite. Para esta calda obteve-se o valor de 11,8 s. Confirma-se o aumento de viscosidade da calda por efeito da adição da bentonite.

3.4.2. Exsudação

O ensaio de exsudação consiste na determinação da quantidade de água que reflui à superfície de uma calda deixada em repouso, com impedimento da evaporação. Este parâmetro é medido através de um valor percentual dado pela equação 1.

$$Exsudação = \frac{v_1}{v} \times 100 \quad (1)$$

sendo v_1 o volume de água sobrenadante à superfície da calda e v o volume inicial da calda.

O valor de exsudação obtido para a calda de cimento-bentonite foi de 3,1% e para a calda de cimento simples com a mesma razão água/cimento, 2,7%. Confirma-se a estabilização da calda por efeito da adição de bentonite.

3.4.3. Variação de volume

A variação de volume da calda pode ser atribuída a factores como a expansibilidade ou a sedimentação. Neste ensaio determina-se a variação entre o volume final e inicial da calda, após decorridas 24 horas.

Este parâmetro pode ser avaliado pela equação 2.

$$V.V. = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \times 100 \quad (2)$$

sendo h_1 a altura inicial do provete inserido numa proveta cilíndrica com 200mm de altura e 50mm de diâmetro, e h_2 a altura da calda nessa proveta após 24 horas.

A variação de volume obtida para a calda de cimento-bentonite foi de -3,3%, enquanto para a calda de cimento com a mesma razão água/cimento obteve-se -25,8%, o que está de acordo com a natureza expansiva da bentonite por efeito da hidratação.

3.4.4. Tempo de presa

Após decorridos 300 minutos do fabrico da calda inicia-se o ensaio para avaliação do tempo de presa da calda.

Os resultados indicam um tempo de início de presa médio de cerca de 2 dias e de final de presa de 2-3 dias após o início do ensaio.

3.5. Ensaio para caracterização de propriedades mecânicas – deformabilidade e resistência

3.5.1. Avaliação do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico de 3 provetes prismáticos foi avaliado através da medição da frequência de ressonância de cada provete, utilizando a equação (3).

$$E_d = \frac{4L^2 \cdot F^2 \cdot \rho}{g} \quad (3)$$

em que L é o comprimento do provete, F a frequência de ressonância, ρ a massa volumica e g a aceleração gravítica.

O valor médio obtido para o Módulo de Elasticidade Dinâmico é de 1800MPa.

3.5.2. Ensaio de compressão simples

O ensaio de compressão simples para caldas de injeção é realizado sobre pelo menos três provetes cilíndricos ou prismáticos. Neste caso os resultados dizem respeito ao ensaio de provetes cilíndricos, e ao longo de várias idades do provete (7, 14, 28, 90 e 180 dias), cf. Figura 3.4. Os resultados médios apresentam-se no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Resultados do ensaio de compressão simples da calda

Idade [dias]	7	14	28	90	180
Tensão média – f_c [MPa]	3,9	5,0	5,7	5,6	6,4
Desvio Padrão [MPa]	0,6	0,2	0,7	0,5	0,5



Figura 3.4 – Ensaio de compressão simples [15]

3.5.3. Ensaio de flexão

O ensaio de flexão é utilizado para a avaliação do comportamento dos provetes à tracção. Este ensaio realiza-se sobre provetes prismáticos cf. Figura 3.5.

Os valores médios obtidos para este ensaio estão indicados no Quadro 3.6.

Quadro 3.6 – Resultados do ensaio à flexão da calda

Idade [dias]	7	28
Carga média na rotura [kN]	0,494	0,810
Tensão média - f_t [MPa]	1,162	1,893
Desvio padrão [MPa]	0,392	0,524



Figura 3.5 – Provetes utilizados no ensaio de flexão [15]

3.5.4. Ensaio indirecto à tracção – Placa circular com modo de rotura determinado

O ensaio de uma placa circular com modo de rotura determinado tem como objectivo a determinação da resistência à tracção da calda, através do ensaio de um provete circular simplesmente apoiado em três pontos equidistantes, cf. Figura 3.6.



Figura 3.6 – Provete de placa circular ensaiado [15]

Os resultados deste ensaio estão indicados no Quadro 3.7 e na Figura 3.7.

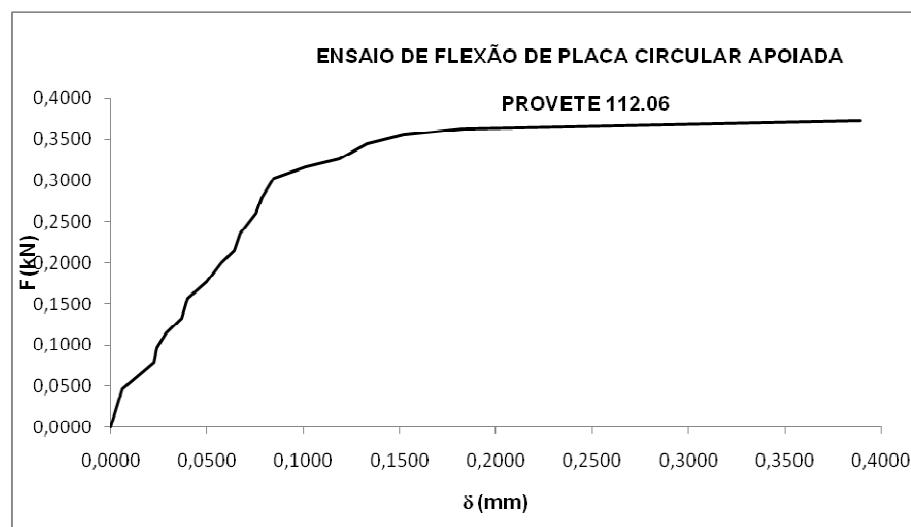


Figura 3.7 – Curva força-deslocamento a meio vão do ensaio de placa circular com modo de rotura determinado

Quadro 3.7 – Resultados do ensaio da placa circular com modo de rotura determinado

Leituras	Deslocamento corrigido [mm]	F [kgf]	F [kN]
0	0,0000	0,00	0,0000
1	0,0064	4,75	0,0466
2	0,0224	7,98	0,0783
3	0,0240	9,88	0,0969
4	0,0288	11,59	0,1137
5	0,0369	13,49	0,1323
6	0,0401	16,06	0,1575
7	0,0497	18,05	0,1771
8	0,0577	20,43	0,2004
9	0,0641	21,85	0,2143
10	0,0673	23,94	0,2349
11	0,0753	26,51	0,2600
12	0,0785	28,50	0,2796
13	0,0849	30,88	0,3029
14	0,1010	32,30	0,3169
15	0,1186	33,25	0,3262
16	0,1330	35,15	0,3448
17	0,1522	36,20	0,3551
18	0,1827	36,96	0,3625
19	0,3894	38,00	0,3728

Os resultados relativos a este ensaio serão utilizados mais adiante, bem como será desenvolvido em pormenor este tipo de ensaio.

4. Modelação de Ensaio de uma Placa Circular de Calda de Cimento-Bentonite

Num trabalho de injeção de calda é importante conhecer as propriedades do material calda a aplicar – resistência à compressão, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson e a sua resistência à tracção – e a sua evolução ao longo do processo de maturação (ganho de presa).

No projecto de investigação em que esta dissertação se insere, foi realizado um programa extenso de caracterização físico-química, mecânica e hidráulica de misturas de cimento-bentonite, com 2% de fracção ponderal da massa de bentonite em relação à massa de cimento. Uma das contribuições da presente Dissertação para esse projecto, é o aprofundamento da problemática da experimentação e modelação matemática da resistência à tracção da calda. Este aspecto é fundamental para o seu desempenho, em particular do ponto de vista hidráulico.

Neste capítulo, abordam-se os tipos de ensaio adequados para a avaliação do comportamento à tracção de argamassas aplicadas ao caso particular das caldas de cimento-bentonite, com base na identificação de tipos de ensaio e suas limitações, de entre vigas e placas. Procede-se à comparação dos méritos relativos de todos os ensaios para identificar o de maior fiabilidade.

A modelação numérica aplicada ao ensaio mais fiável é depois descrita e discutida em pormenor, tendo por base um caso prático.

4.1. Influência da tracção e ensaios de avaliação do comportamento de uma calda

A permeabilidade das caldas de cimento-bentonite reveste-se de grande importância, e portanto a resistência à tracção do material deve ser tida em consideração. Em traços gerais, a fraca resistência à tracção do material facilita a fendilhação, e por conseguinte pode aumentar significativamente a sua permeabilidade.

É conhecido que o betão apresenta baixa resistência á tracção [18]. Para melhorar esta característica do betão em obra são habitualmente utilizados varões de aço ou fibras de diversos materiais, dado que a composição do betão tem somente influência marginal no seu comportamento à tracção. À semelhança do betão, as

caldas apresentam uma pequena, ainda menor, resistência à tracção, quando comparada com a sua resistência à compressão.

4.1.1. Ensaios para caracterização da resistência à tracção

Os ensaios com aplicação directa de tracção aparentam ser a forma natural de ensaiar provetes em relação à resistência à tracção. No entanto, estes ensaios apresentam limitações e erros relacionados com perturbações e incertezas nos valores medidos das tensões, devidos à célula de carga [24] e à natureza frágil da rotura à tracção. Assim, os ensaios indirectos baseados no comportamento à flexão apresentam-se como soluções alternativas para a avaliação do comportamento à tracção de provetes.

De entre os ensaios indirectos desenvolvidos para avaliação do comportamento à tracção de diversos tipos de materiais homogéneos, tanto em vigas/pilares como em placas, os mais comuns são:

- o ensaio Brasileiro ("*Brazilian Test*"), o ensaio EFNARC com três pontos de carregamento [9];
- o ensaio de carregamento a meio-vão proposto por Bernard [9] e;
- o ensaio de Barcelona [4].

Para as placas, os ensaios mais comuns são:

- os ensaios EFNARC de placas quadradas [8] e [9] e;
- os ensaios de modo de rotura imposto em placas circulares [8] e [9].

No entanto, existem outros tipos possíveis de ensaios em placas circulares, diferindo o modo de apoio em relação ao da placa circular com modo de rotura imposto.

4.1.1.1. Ensaios indirectos em vigas

Ensaio Brasileiro

Um dos ensaios mais utilizados em vigas, para avaliar a resistência à tracção de forma indirecta de um material, é o ensaio Brasileiro (*Brazilian Test* ou *Splitting Tensile Test*).

A resistência à tracção é estimada através da aplicação de uma carga de compressão diametral sobre um provete cilíndrico, através de duas placas, criando uma força de tracção no plano normal à aplicação da carga [1], (cf. Figura 4.1). Esta carga é aplicada até o provete atingir a rotura, e a tensão é determinada através da equação 4. As dimensões dos provetes devem estar de acordo com [19].

$$f_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (4)$$

em que P é a carga aplicada, D o diâmetro do provete e L o seu comprimento.

Este ensaio apresenta como principais vantagens a utilização de provetes idênticos e da mesma prensa utilizada para a avaliação da resistência à compressão, bem como a facilidade de ensaio. Contudo, o ensaio Brasileiro tende a fornecer resultados de resistência à tracção mais conservativos que os valores reais (cerca de 50% inferiores) [1].

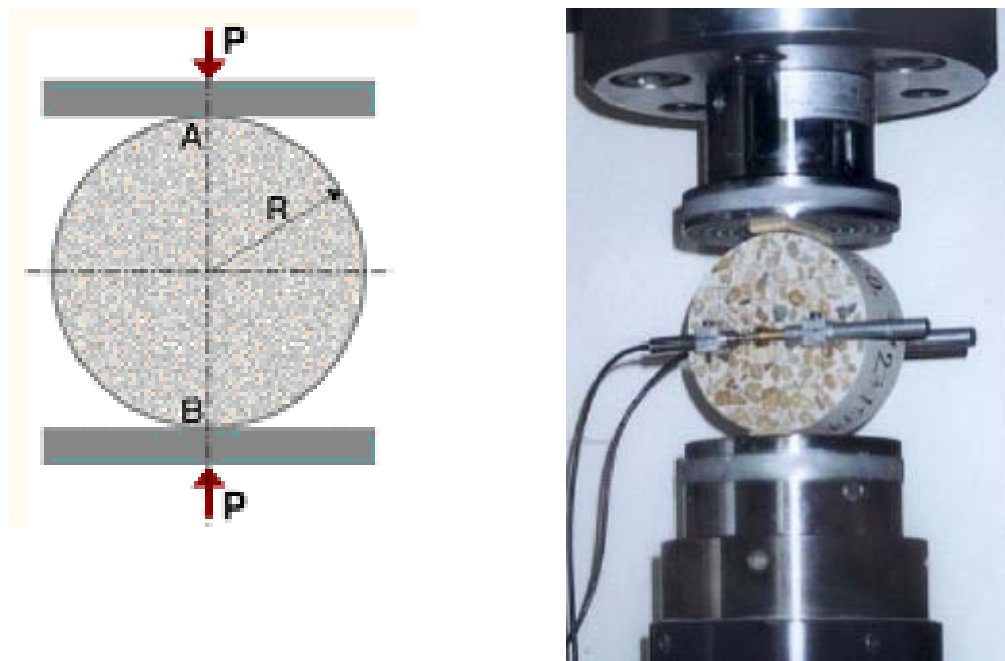


Figura 4.1– Demonstração e esquema do ensaio Brasileiro [24]

Ensaio EFNARC

Os ensaios EFNARC com três pontos de carregamento são desenvolvidos sobre um provete com dimensões 75x125x550mm, com um vão de 450mm, como se mostra na Figura 4.2. Estes provetes são parcelas cortadas de vigas maiores ou de placas.

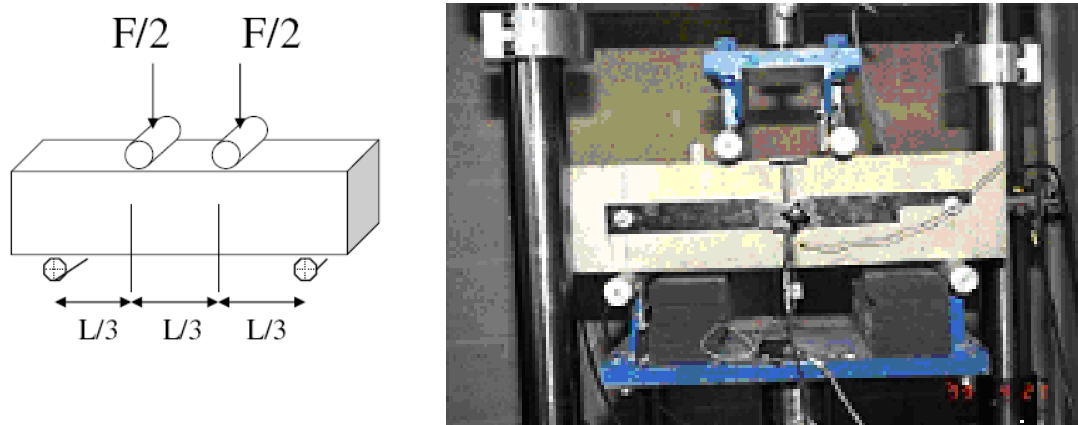


Figura 4.2 – Pontos de carregamento em vigas EFNARC [10]

Para a avaliação do desempenho destes provetes [9], são registados os valores da força actuante e da flecha a meio-vão, e calculados o Módulo de Rotura utilizando a teoria da flexão elástica, a carga de pico imediatamente antes da fendilhação, o vão e o módulo da secção na posição da fenda [24]. A tenacidade – energia absorvida pelo material antes de atingir a rotura – também é quantificada em termos de esforços residuais, índices de tenacidade de acordo com ASTM C-1018 e absorção de energia de acordo com JSCE SF4.

Os índices de tenacidade definidos pela norma americana ASTM C-1018 deixaram de ser utilizados e surgiu uma nova metodologia baseada na norma ASTM C-1609. A quantificação da tenacidade pela norma japonesa é dada pelos parâmetros de tenacidade T_b e f_e , que são a área sob o gráfico força-deslocamento até 3,0mm e a resistência à flexão equivalente, respectivamente, como mostram a Figura 4.3 e a equação 5.

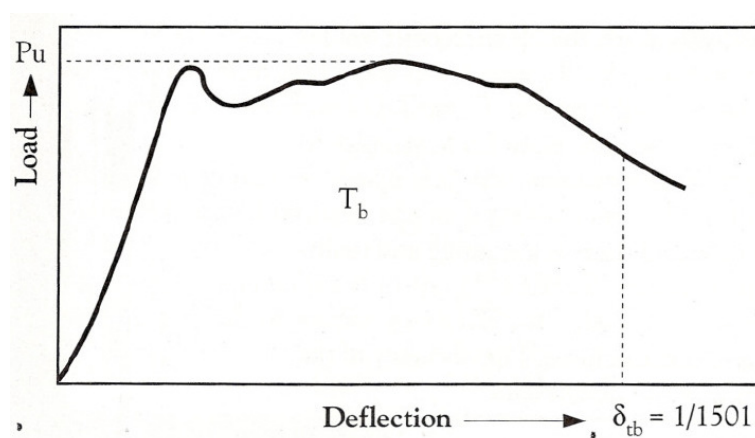


Figura 4.3 – Curva força-deslocamento com representação da tenacidade T_b [24]

$$f_e = \frac{T_b}{\delta} \cdot \frac{L}{b \cdot h^2} \quad (5)$$

Sendo b e h , a base e a altura da secção, respectivamente.

Os esforços residuais são determinados utilizando o módulo da secção no ponto de fendilhação e a capacidade de carga residual da viga para deformações de 0,5mm e 3,0mm, que equivalem a 1/900 e 1/150 do vão, respectivamente.

No entanto, este ensaio apresenta limitações relacionadas com a insuficiência de controlo sobre a posição das fendas, visto a carga ser aplicada em dois pontos que limitam uma zona na qual a fendilhação pode desenvolver-se sem restrições de posição. Isto pode levar a resultados bastante diferentes dos ângulos de rotação numa fenda, para uma deformação conhecida, o que proporciona inconsistência nos resultados, mesmo em provetes idênticos.

Vigas carregadas a meio-vão

O ensaio de vigas carregadas a meio-vão proposto por Bernard [9] tenta colmatar as limitações do ensaio EFNARC em vigas, mantendo as dimensões do provete. Pode observar-se um esquema do ensaio na Figura 4.4.

Também neste ensaio a posição das fendas é previamente indeterminada. No entanto, devido ao facto de a viga ser carregada a meio-vão a rotura é mais próxima do ponto de carga, resultando numa rotação da fenda mais consistente para uma deformação conhecida. A relação momento-rotação da fenda obtida a partir do ensaio é importante do ponto de vista estrutural.

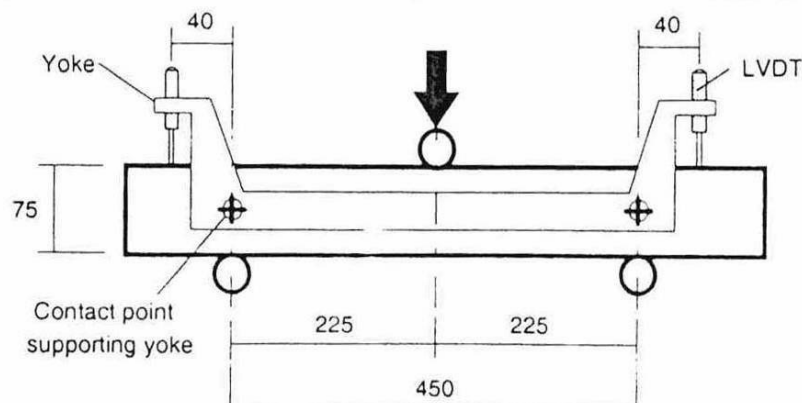


Figura 4.4 – Viga carregada a meio-vão proposta por Bernard [24]

Neste ensaio, o comportamento dos provetes, é descrito em termos do Módulo de Rotura e do momento resistente na fase fendilhada, expresso como função da

rotação da fenda. A energia absorvida pelo provete entre o instante em que fendilha e o instante em que atinge uma rotação relativa na fenda de 0,05 radianos, pode ser estimada através da integração na relação momento-rotação da fenda, visto esta rotação ser equivalente a uma deformação de 5mm [14].

Ensaio de Barcelona

O ensaio de Barcelona [4] é um ensaio de compressão uniaxial, com células de carga de aço cónicas aplicadas no topo e na base de um provete cilíndrico, como se mostra na Figura 4.5. Este ensaio surge como solução para avaliar o comportamento do material à tracção, de uma forma indirecta.

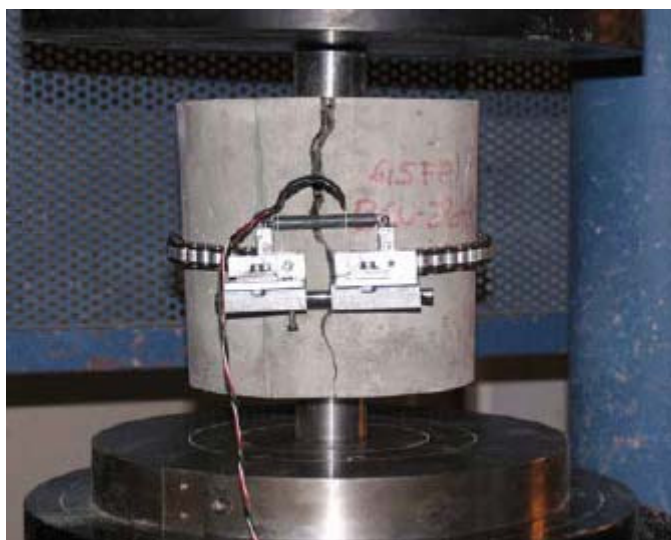


Figura 4.5 – Representação Ensaio de Barcelona [24]

Os provetes utilizados para este tipo de ensaio são cilíndricos, com uma relação diâmetro/altura de 1 ($2b/2h = 1$) e uma relação diâmetro da célula de carga/diâmetro do provete de 0,25 ($2a/2b = 0,25$), como se pode verificar na Figura 4.6. O padrão de fendilhação habitual consiste no desenvolvimento de 3 ou 4 fendas radiais, sendo que a última situação é de ocorrência pouco frequente, cf. Figura 4.7.

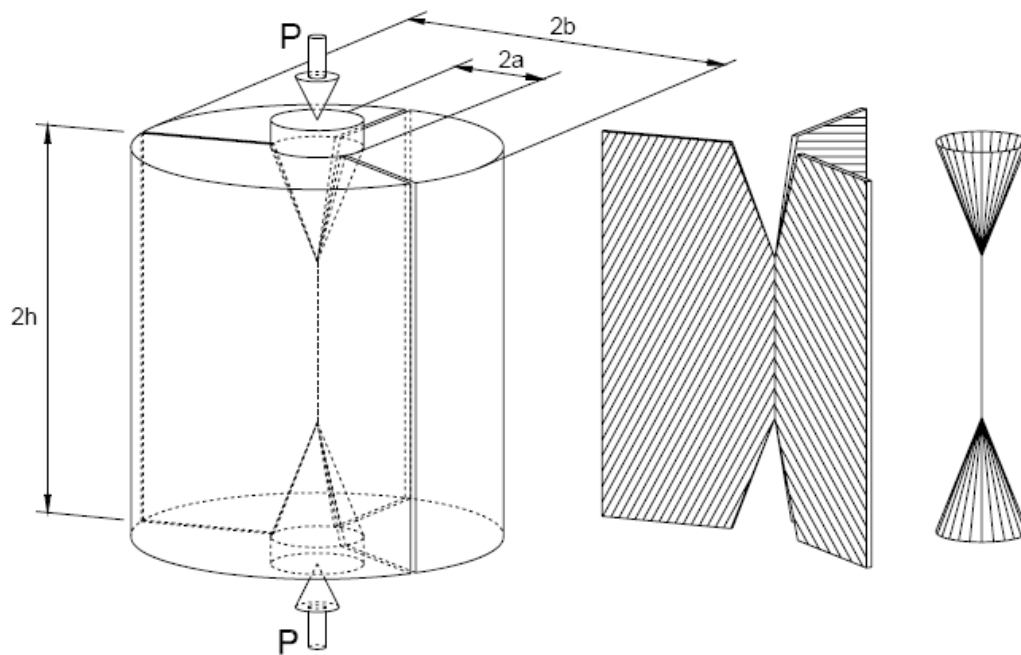


Figura 4.6– Ensaio de Barcelona e superfície de rotura habitual [24]



Figura 4.7 – Superfície de rotura do ensaio de Barcelona [24]

A avaliação do comportamento do provete é feita através das variáveis abertura circunferencial, resistência à tracção, absorção de energia e tenacidade [24].

Como principais vantagens do ensaio de Barcelona, referem-se a menor dispersão de resultados em relação aos restantes ensaios directos e indirectos de tracção, a economia em termos de tempo e a não afectação dos resultados para excentricidades relativamente ao eixo do provete até 5mm da célula de carga, por erros de aplicação. Os provetes utilizados são mais leves.

Este ensaio apresenta valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos nos restantes ensaios em vigas, no que diz respeito à absorção de energia pelo provete, para uma abertura média da fenda equivalente.

Contudo este ensaio não é de fácil desenvolvimento, e os valores para a resistência à tracção são derivados da geometria e da carga última, que é uma tarefa complexa [24].

4.1.1.2. Ensaio indirectos em placas

Placa Quadrada EFNARC

Relativamente aos ensaios realizados em placas, o ensaio EFNARC baseia-se na avaliação do comportamento de placas quadradas com as dimensões 100x600x600mm, simplesmente apoiados em todo o perímetro num aro plano, com dimensões 500x500mm, cf. Figura 4.8. Estes ensaios foram desenvolvidos devido à necessidade de estudar a capacidade dos materiais resistirem a punçoamento.

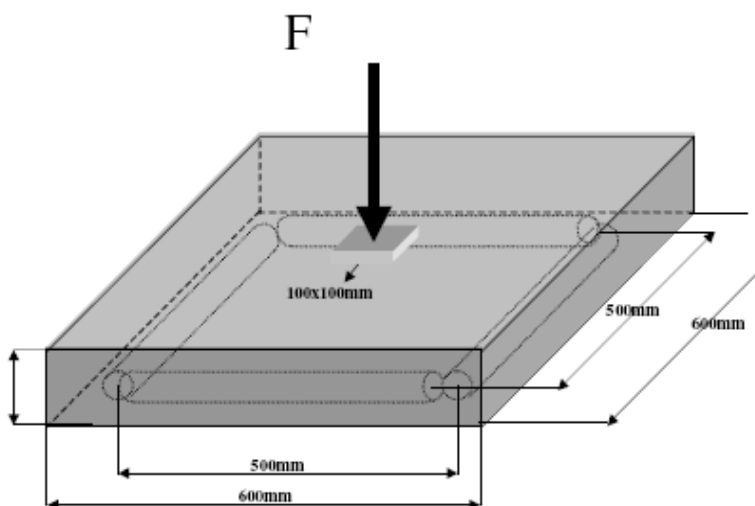


Figura 4.8 – Ensaio EFNARC em placas [12]

A avaliação do desempenho destes provetes realiza-se através da capacidade de carga e da energia absorvida para uma deformação de 25mm no ponto central. O primeiro parâmetro não é de grande interesse, dada a sua sensibilidade a distorções parasitas na base do provete causadas durante a sua produção. A determinação da energia absorvida pelo provete é um parâmetro de grande importância, dada a sua relação directa com a capacidade deste resistir a cargas impostas no estado fendilhado, e é determinada através da integração da área sob a curva força-deslocamento.

A principal limitação à utilização deste ensaio prende-se com a necessidade de assegurar que a base do provete é plana, de forma a tratar-se de um problema estaticamente determinado. Se a base do provete não é plana, o número dos seus apoios, torna-se indeterminado e, portanto, os resultados apresentam variações para provetes sujeitos a carregamentos idênticos. No caso do provete não ser plano obtém-se vários valores para a carga de pico numa curva força-deslocamento, o que revela inconsistência nos resultados.

Placa Circular com Modo de Rotura Imposto

O ensaio em Placas Circulares com Modo de Rotura Imposto proposto por Bernard [8] e [9] é realizado em provetes com dimensões 75xΦ800mm assentes em 3 apoios colocados a uma distância diametral de 750mm. Este ensaio surgiu com o intuito de colmatar os erros do ensaio em placas quadradas EFNARC, dado o número determinado e reduzido de apoios. A reduzida espessura de 75mm simplifica o comportamento mecânico da placa. A norma que define a metodologia do ensaio é a ASTM C-1550.

Os painéis com modo de rotura imposto, apresentam um modo de rotura habitual, constituído por 3 fendas radiais por flexão distanciadas de cerca de 120º [8], cf. Figura 4.9. Por vezes existe a ocorrência de 4 fendas radiais, contudo a abertura da última fenda é muito reduzida comparativamente com as aberturas das anteriores.

Nestes provetes os parâmetros a determinar são os mesmos que para o ensaio anterior – capacidade de carga e energia absorvida para deformações conhecidas. Em [9] são calculadas as energias absorvidas para deformações de 5 e 40mm para avaliar a performance das fibras na fase fendilhada. A utilização deste ensaio para a caracterização de caldas cimentícias não reforçadas limita estas determinações, dada a natureza frágil do comportamento à tracção das placas deste tipo de caldas

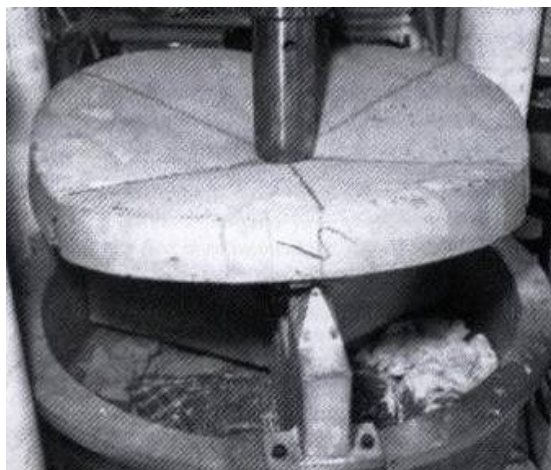


Figura 4.9 – Rotura de Painel Circular com Modo de Rotura Imposto em três segmentos [11]

4.1.1.3. Comparação de resultados

Em relação aos resultados obtidos para as vigas, os valores dos módulos de rotura das vigas com três pontos de carregamento e das vigas carregadas a meio-vão, são bastante semelhantes como revela Bernard [9]. No que diz respeito aos valores da energia absorvida, o ensaio de Barcelona também se aproxima dos restantes ensaios em vigas. Quanto aos resultados obtidos para o comportamento no estado fendilhado, as vigas apresentam uma relação pouco consistente.

As placas apresentam uma relação linear no que se refere à fase fendilhada [9], quando comparadas graficamente as energias absorvidas por ambos os provetes. Isto indica que existe um factor de conversão entre os resultados de ambas as placas. A 1000 Joules de energia absorvida para um deslocamento de 25mm das placas EFNARC correspondem 400 Joules de energia absorvida para um deslocamento de 40mm das placas circulares com modo de rotura imposto.

A energia absorvida na fase fendilhada pelas vigas com três pontos de carregamento e pelas placas, também apresenta forte correlação para grandes deformações, mas para pequenas deformações os resultados apresentam reduzida consistência [9].

Em conclusão, Bernard [9] refere que existe forte correlação entre os parâmetros avaliados em vigas e placas para grandes deformações, mas apresentam-se pouco consistentes no que respeita a pequenas deformações. Os valores obtidos pelo autor para a energia absorvida pelas placas, são muito idênticos e indicam que ambos os ensaios são adequados para a avaliação do comportamento do material na fase fendilhada sob grandes deformações.

Para a escolha do tipo de ensaio mais adequado existem factores a ter em consideração como a economia, morosidade, facilidade de execução do ensaio e fiabilidade dos resultados. Os ensaios em vigas revelam-se os ensaios mais dispendiosos em termos económicos, devido à dificuldade de produção dos provetes e o grau de sofisticação para a execução do ensaio, que se revela também mais moroso. O ensaio da placa circular com modo de rotura imposto revela a menor variação nos resultados na fase fendilhada e apresenta-se como o ensaio com maior facilidade de execução. Os coeficientes de variação, são um indicador da fiabilidade dos resultados e são indicados no Quadro 4.1, segundo [4].

Quadro 4.1 – Coeficientes de variação dos resultados obtidos para todos os provetes [4]

Ensaio	Coeficiente de Variação (%)
EFNARC vigas	20
Carregamento ½ vão	17
Barcelona	13
EFNARC placas	9
Placa circular de Modo de Rotura Imposto	6-13

Como se pode verificar, em termos de dispersão, as placas circulares com modo de rotura imposto também apresentam menores valores de coeficientes de variação. Estes resultados aliados à economia em termos de custo, morosidade e facilidade de execução sugerem que este tipo de provete é o mais indicado para a avaliação do comportamento mecânico, através da absorção de energia.

Bernard [8], compara ainda o comportamento de placas circulares com diferentes condições de apoio, de entre placas simplesmente apoiadas, de modo de rotura imposto, de bordo completamente restringido e de bordo quase-contínuo.

O autor avalia o comportamento destes provetes sujeitos a cargas pontuais, com base em ensaios de deslocamentos impostos através duma célula de carga com $\Phi 100\text{mm}$ aplicada ao centro.

Os parâmetros registados para avaliação do comportamento dos provetes são a capacidade de carga máxima, a energia total absorvida durante a rotura e o padrão e número de fendas.

Concluindo, Bernard verifica que os modos de apoio que impedem as rotações no bordo (condições de bordo completamente restringido e de bordo quase-contínuo) referem-se a roturas essencialmente por corte, enquanto que as placas com modos de apoio simples rompem à flexão. Assim, a placa com modo de rotura imposto apresenta-se como a solução mais viável, visto apresentar menor sensibilidade em relação à planeza do provete e maior consistência no modo de rotura, bem como valores inferiores de capacidade de carga de pico e de absorção de energia total, que permitem obter um grau de segurança superior em relação aos restantes modos de apoio.

As conclusões referidas dizem respeito a ensaios realizados em provetes de betão reforçado com fibras de aço. No entanto, estas podem estender-se a materiais homogéneos, como é o caso das caldas de cimento-bentonite. Neste caso, há apenas que considerar a rotura mais frágil dos provetes, que se reflecte numa fase fendilhada mais curta até atingir a rotura, devido à ausência do aço que é o principal responsável pela resistência à tracção da mistura.

4.1.2. Ensaio de Placa Circular com Modo de Rotura Imposto

Como ensaio mais adequado para a avaliação do comportamento à tracção de provetes, torna-se necessária a descrição mais pormenorizada do ensaio de placas circulares com modo de rotura imposto.

Este ensaio é realizado sobre um provete circular com dimensões $\Phi 800 \times 75 \text{ mm}$, assente em três apoios equidistantes ao centro, com abertura de 120° e distância diametral de 750mm, como mostra a Figura 4.10. Estes apoios apenas restringem os deslocamentos verticais e são formados por rótulas.

No centro do provete é colocada uma célula de carga circular com diâmetro de 10mm, que permite a imposição de deslocamentos através da utilização de uma prensa, como mostram a Figura 4.11 e Figura 4.12 (proвете e equipamento utilizados nos ensaios realizados no LNEC).

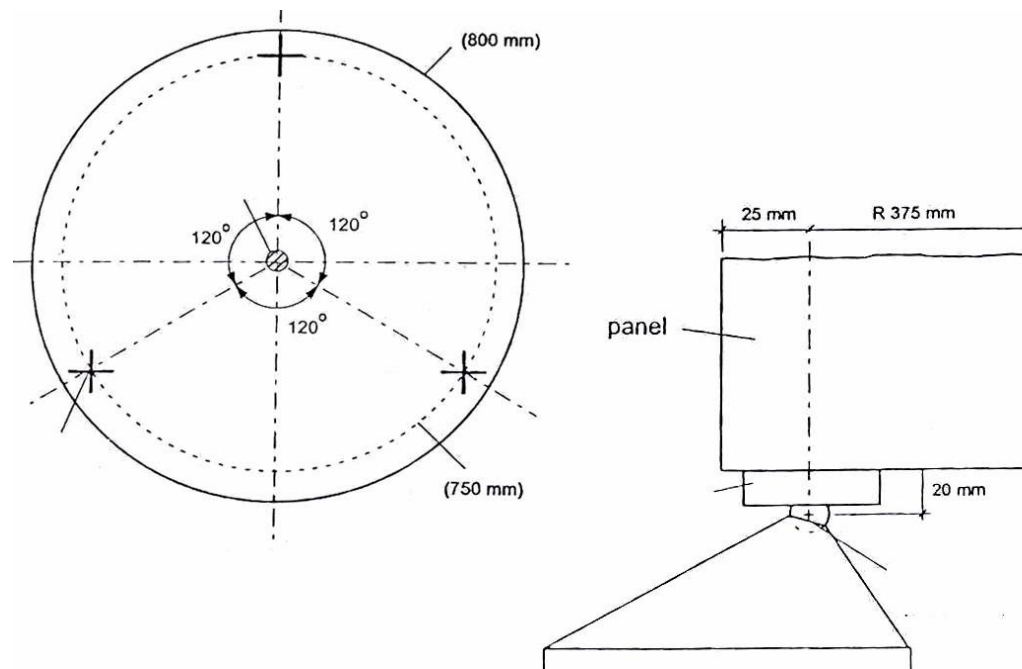


Figura 4.10 – Esquema de Placa com Modo de Rotura Imposto [24]

Também ao centro é colocado um deflectómetro, na parte inferior do provete, que permite o registo dos deslocamentos a cada passo de carga.

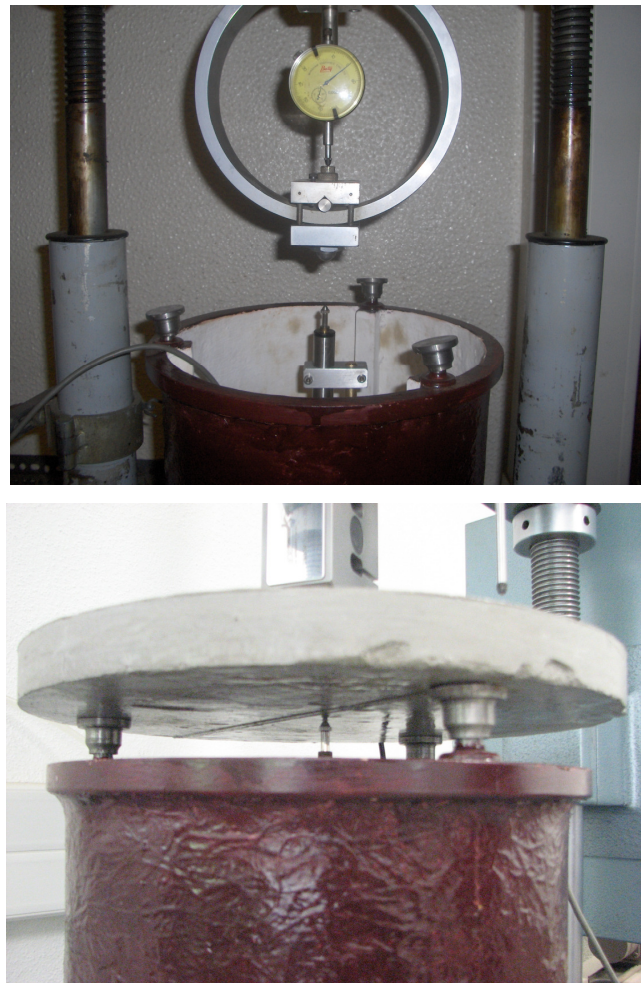


Figura 4.11 – Demonstração das condições de apoio e de medição dos deslocamentos [15]



Figura 4.12 – Configuração do ensaio de Placa Circular com Modo de Apoio Determinado [15]

A configuração de rotura das placas circulares com modo de rotura imposto mais habitual consiste em três fendas radiais simétricas, distanciadas de cerca de 120° (cf. Figura 4.13). Estas fendas surgem equidistantes relativamente aos apoios.

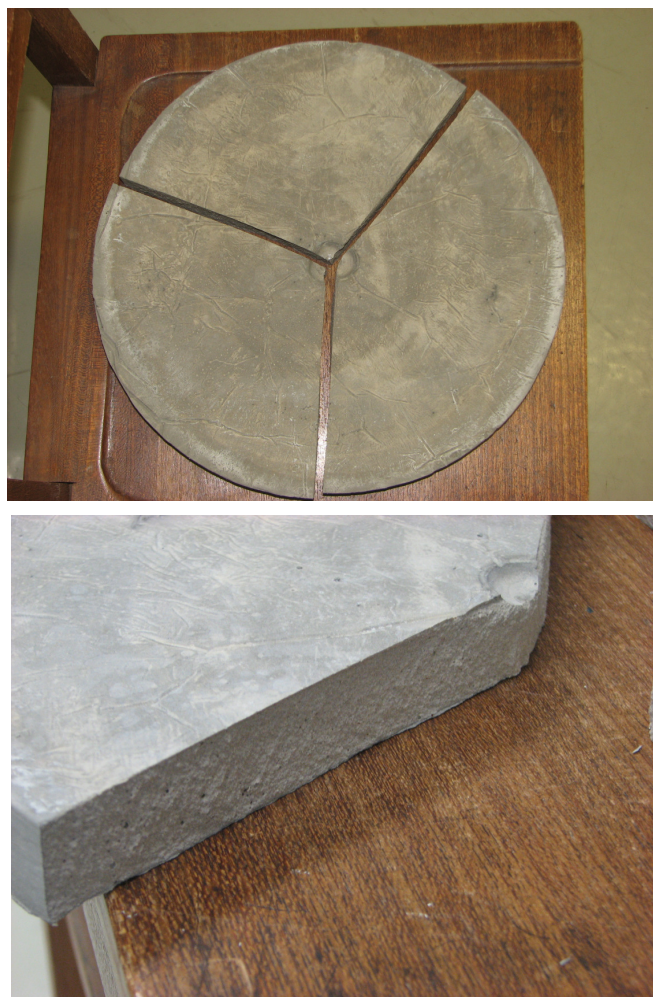


Figura 4.13 - Configuração de rotura de placa circular com modo de rotura imposto

4.2. Modelação numérica do ensaio de uma Placa Circular com Modo de Rótura Imposto

A modelação numérica é uma ferramenta que permite a simulação de ensaios do material, condições de apoio e de carregamento pretendidos. No entanto, estas ferramentas não dispensam a realização de ensaios.

Na modelação descrita neste capítulo recorreu-se ao software ANSYS 11. Para simular o ensaio de uma placa circular com modo de rótura imposto, basta estudar apenas um terço do provete, dada a simetria estrutural (geometria, condições de apoio e de carregamento), cf. Figura 4.14.

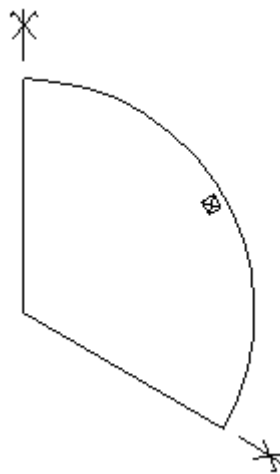


Figura 4.14 – Parcela representativa das condições de apoio de uma placa de modo de apoio determinado

4.2.1. Exigências

Pretende-se modelar uma placa circular com modo de rótura imposto de calda cimento-bentonite, e estudar o seu comportamento à flexão, indutora de tracção evidenciada pela deformação da placa.

As exigências relativas ao modelo prendem-se com a capacidade de utilizar um material isotrópico, homogéneo e com propriedades não lineares, e de apresentar deformações plásticas, e ainda de fendilhar à tracção e esmagar à compressão, devido à aplicação dum deslocamento imposto através duma célula de carga no centro do provete.

4.2.2. Modelo Constitutivo

4.2.2.1. Características do Modelo

Os elementos disponíveis no software que permitem a aproximação referida nas exigências do modelo são os elementos Solid65. Os elementos Solid65 caracterizam a rotura de materiais frágeis (betão, rochas e outros materiais com baixa resistência à tracção e elevada resistência à compressão), através da capacidade de fendilhar à tracção e esmagar à compressão.

Estes elementos são constituídos por oito nós, cada um com três graus de liberdade (translações em x , y e z), cf. Figura 4.15, podem fendilhar nas três direcções ortogonais em cada ponto de integração; se ocorre fendilhação num ponto de integração, a fenda é modelada através do ajuste das propriedades do material, que representa a zona fendilhada através de uma “mancha”; o material betão é assumido como sendo inicialmente isotrópico; além de fendilhar e esmagar, o betão também pode plastificar segundo o critério de Drucker-Prager, a mais comum, e neste caso a fase plástica é atingida ainda antes de se verificar a fendilhação e o esmagamento.

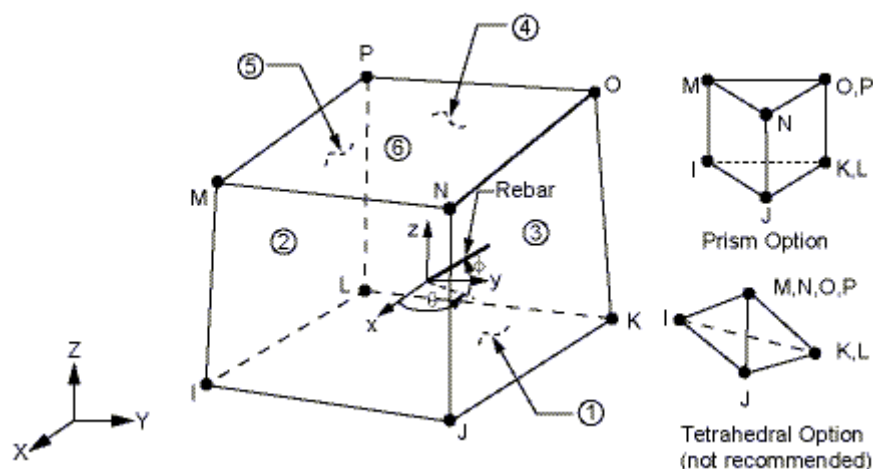


Figura 4.15 – Elementos finitos Solid65 [2]

Estes elementos permitem modelar sólidos e permitem a utilização de até três materiais de reforço, que não consta nas exigências do modelo pretendido. As principais características do material tipo betão são a sua capacidade de fendilhar e esmagar, e a capacidade de experimentar deformações plásticas e de assumir um comportamento não linear do material.

4.2.2.2. Dados a introduzir

Os elementos Solid65 são elementos definidos por oito nós e pela utilização de materiais com propriedades isotrópicas. Podem ser constituídos por um material sólido e até três materiais de reforço, homogeneamente distribuído, e com orientação aleatória, configurando, assim, um material homogêneo e isotrópico.

Para definir um modelo Solid65 é necessário definir a superfície de cedência do material, através da introdução de parâmetros. Para o material sólido tipo betão basta definir a sua massa volúmica, módulo de elasticidade, coeficiente de Poisson, a sua resistência à tracção uniaxial que representa cerca de 8 a 15% da sua resistência uniaxial à compressão, a qual tem também de ser definida. Para a avaliação do comportamento do material à compressão uniaxial, tem de definir-se uma relação tensão-deformação. A curva tensão-deformação do betão apresenta-se na forma mostrada na Figura 4.16.

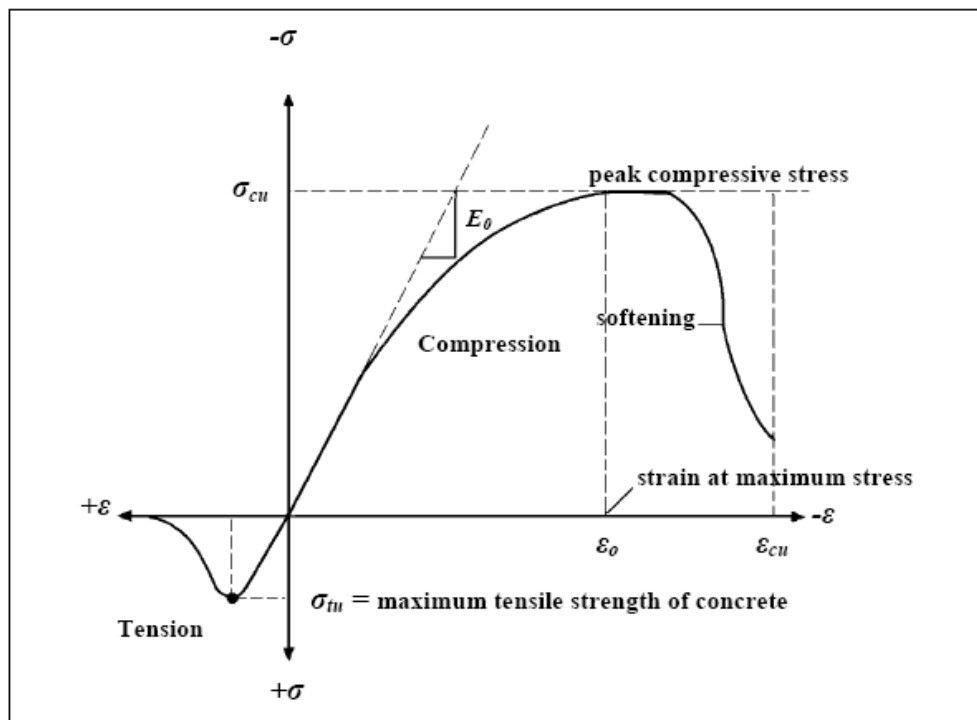


Figura 4.16 – Curva tensão-deformação do material sólido tipo betão [6]

Em compressão, o material tem um comportamento aproximadamente linear até atingir a sua resistência máxima σ_{cu} ou f_c , seguindo-se-lhe uma fase de decréscimo dos valores das tensões até atingir a deformação última ε_{cu} , onde eventualmente ocorrerá o esmagamento.

Em tracção, a curva tensão-deformação cresce linearmente até atingir a resistência máxima à tracção, e a partir desse momento o material fendilha e o valor das tensões decresce gradualmente até ao valor de 0.

Para a definição da curva tensão-deformação à compressão uniaxial do material referida acima como parâmetro a introduzir, rege-se pelas seguintes expressões, onde:

$$\sigma = \frac{E\varepsilon}{1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} \quad (6)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{2f_c}{E} \quad (7)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (8)$$

Sendo σ a tensão para qualquer deformação ε correspondente e ε_0 a deformação correspondente à resistência última à compressão f_c .

A Figura 4.17 representa uma possível relação tensão-deformação à compressão uniaxial em que o ponto 1 representa a fase linear do material e corresponde a 30% da resistência à compressão uniaxial do material. A deformação correspondente pode ser determinada através da equação 6. Os pontos 2, 3 e 4 são escolhidos aleatoriamente e determinados através da equação 6. O ponto 5 corresponde à tensão máxima – resistência à compressão uniaxial do provete – e a deformação correspondente é determinada através da equação 7.

O material sólido deve ainda ser definido por dados adicionais como os coeficientes de transferência. Estes coeficientes representam a percentagem de transferência das tensões de corte transmitidas através da fenda, após a fendilhação do material. Os coeficientes de transferência ao corte são valores que variam entre 0 e 1, em que 0 representa uma fendilhação suave (perda completa de transferência ao corte) e 1 representa uma fendilhação mais brusca (sem perdas de transferência ao corte). Os coeficientes de transferência devem ser definidos tanto para fendas abertas como fechadas.

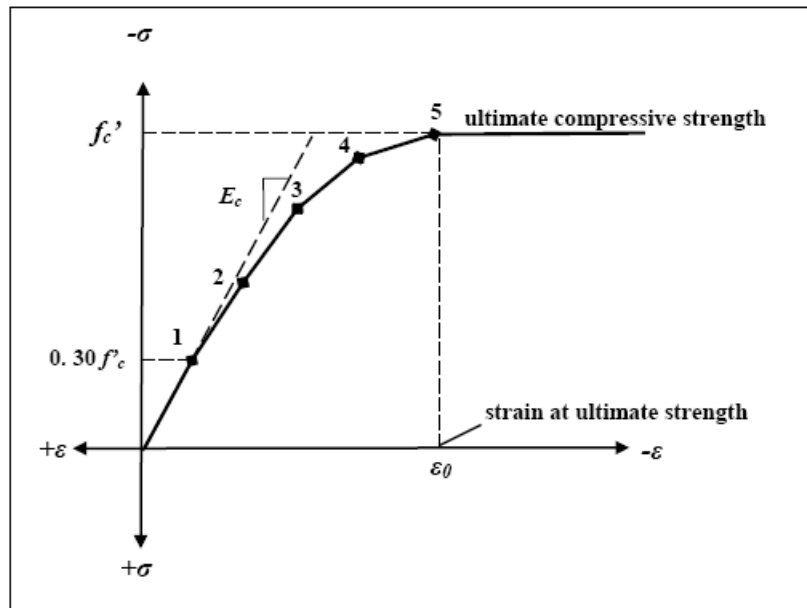


Figura 4.17 – Exemplo de curva tensão-deformação à compressão uniaxial [6]

Para a definição da superfície de cedência dos elementos Solid65 basta definir as resistências à tracção e compressão uniaxial do material, já referidas acima como parâmetros do material. As tensões principais diferentes de zero mais significantes são segundo as direcções principais x e y , σ_{xp} e σ_{yp} . O modo de rotura é uma função do sinal de σ_{zp} , como se pode verificar pela Figura 4.18.

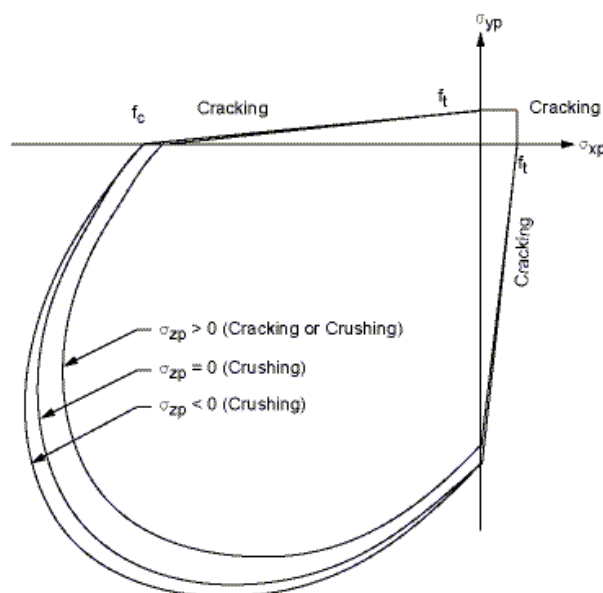


Figura 4.18 - Superfície de cedência definida para os elementos Solid65 [2]

O elemento fendilha sempre que numa das direcções principais é excedida a resistência à tracção do material. Para que ocorra esmagamento é necessário que em todas as direcções principais, o provete se encontre em compressão.

4.2.2.3. Resultados

Os resultados possíveis de obter em elementos Solid65, são as tensões e deformações nas direcções ortogonais e principais, elásticas e plásticas, deslocamentos nodais nas três direcções ortogonais, reacções e um *status* que indicam se o material atingiu a rotura, se se encontra esmagado e se apresenta fendas abertas ou fechadas.

Também se pode verificar a orientação das fendas no caso do material fendilhar.

4.3. Calibração do Software ANSYS com base num documento

Para a utilização de um software com um determinado grau de fiabilidade há que conhecer e testar as suas capacidades numa fase primária.

No caso do ANSYS, pretende-se modelar uma placa circular com modo de rotura imposto. No entanto, e para que se possa confiar nos resultados obtidos pelo software, inicialmente recorre-se a um documento que apresenta um modelo de uma placa circular simplesmente apoiada [5]. Este documento descreve a modelação de um ensaio no software ABAQUS e a comparação dos resultados obtidos experimentalmente e computacionalmente, para a calibração desse programa.

O que se pretende é aplicar o mesmo modelo no software ANSYS, de forma a fazer uma comparação dos resultados que permita utilizá-lo com um grau de fiabilidade razoável.

4.3.1. Geometria e Condições de Fronteira

A placa circular tem um raio de 790 mm, e está apoiada uniformemente e em toda a distância radial de 750 mm. A carga é aplicada numa célula circular com diâmetro de 150 mm. Assim, dada a simetria da placa, basta modelar apenas uma parcela correspondente a 1/8 do seu tamanho, como se apresenta na Figura 4.19.

A um raio de 750 mm são restringidos os deslocamentos verticais. Nos bordos de simetria, as condições de fronteira aplicadas são a restrição do deslocamento na direcção perpendicular a esses bordos e restrição das rotações na direcção paralela aos mesmos.

É simulada a aplicação dum deslocamento vertical gradual com limite de 30 mm, em todos os pontos situados a uma distância radial ao centro de 75 mm.

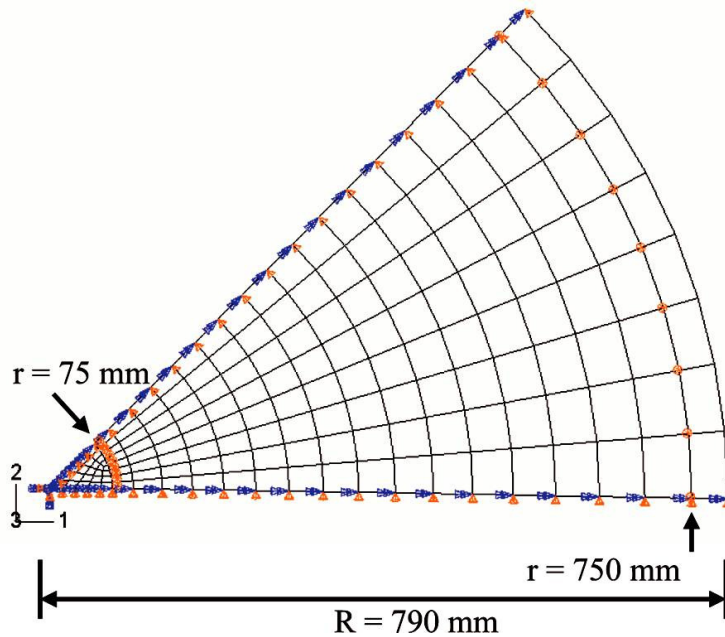


Figura 4.19 – Representação do Modelo de Placa Circular Simplesmente Apoiada [5]

4.3.2. Material

O material considerado na referência [5] é betão reforçado com fibras de aço, com duas dosagens, uma de 80 kg/m³ e outra de 100 kg/m³. No entanto, para o nosso caso de modelação em ANSYS apenas consideraremos o material betão utilizado com as características descritas no documento para a dosagem de fibras de 100 kg/m³, e na discussão dos resultados faremos os reparos necessários para obter uma relação fiável.

Os parâmetros do material são os seguintes:

- Massa volúmica, $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$;
- Resistência característica à compressão em provetes cúbicos aos 28 dias, $f_{ck,cube} = 43,7 \text{ MPa}$

$$f_{ck} \approx 0,8 f_{ck,cube} \quad (9)$$

Logo, a resistência característica à compressão em provete cilíndricos, $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$, pela equação 9;

- Resistência à tracção, $f_t = 2,5 \text{ MPa}$;

- Módulo de Young, $E = 24 \text{ GPa}$;
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,15$;
- Coeficientes de transferência de tensões ao corte, $\beta = 0,2$

Este valor é o mais indicado para a convergência da solução neste tipo de estruturas, quando sujeitas a baixos níveis de carregamento;

- Como pontos que definem a relação tensão-deformação à compressão, e utilizando as equações 6, 7 e 8 e a Figura 4.17, obteve-se os valores presentes no Quadro 4.2,

Quadro 4.2 – Pontos definidores da curva extensão-tensão em compressão

Extensão	Tensão [MPa]
0	0
$4,375 \times 10^{-4}$	10,500
$10,208 \times 10^{-4}$	21,826
$16,042 \times 10^{-4}$	29,558
$21,875 \times 10^{-4}$	33,600
$29,167 \times 10^{-4}$	35,000

4.3.3. Malha

A escolha da malha é um factor importante quando se pretende obter resultados dum modelo computacional. Portanto, a malha deve ser mais refinada nas zonas de maiores esforços, de modo a obter valores mais precisos. No entanto, os aspectos de economia em termos de morosidade de cálculo implicam que a malha escolhida permita obter valores fiáveis sem um refinamento excessivo.

A malha escolhida para o modelo em ANSYS da placa circular simplesmente apoiada tem 1800 elementos e 2400 nós. Os elementos são os Solid65 com oito nós, e o maior refinamento da malha é na zona da célula de carga, que será onde se desenvolverão maiores esforços. O aspecto da malha está representado na Figura 4.20.

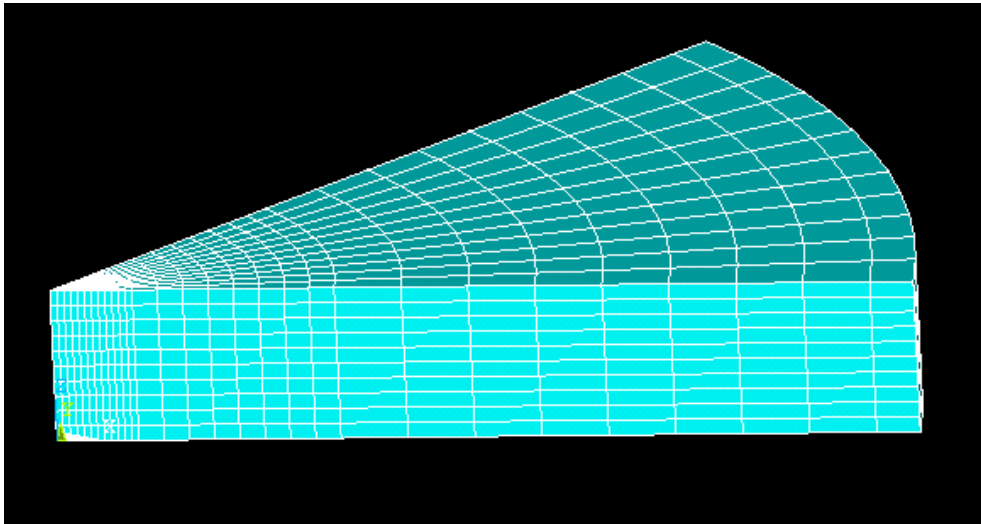


Figura 4.20 – Malha escolhida para o modelo de uma placa circular simplesmente apoiada

4.3.4. Solução

É utilizada uma solução estática que permite grandes deslocamentos com 1000 passos de carga e utilização do método de controlo do processo iterativo *arc-length control*, que auxilia a convergência da solução. Os parâmetros utilizados para o método arc-length são os valores padrão, que em conjunto com o elevado número de passos de carga permite uma maior estabilização do processo de resolução sequencial do equilíbrio.

4.3.5. Análise e comparação dos resultados

Os resultados obtidos traduzem-se em valores de esforços, tensões, deformações e deslocamentos.

Para a comparação dos resultados do documento com os resultados obtidos na modelação em ANSYS, faremos a comparação entre as curvas força-deslocamento, visto ser o único ponto de comparação possível entre os dados fornecidos e obtidos. Para obter o valor da carga correspondente a cada incremento de deslocamento, há que somar as reacções nodais nos nós onde o deslocamento foi imposto e multiplicar por 8, dado estarmos a estudar apenas 1/8 do provete. Assim, fazendo corresponder o valor da carga a cada valor de deslocamento, obteve-se a curva presente na Figura 4.21.

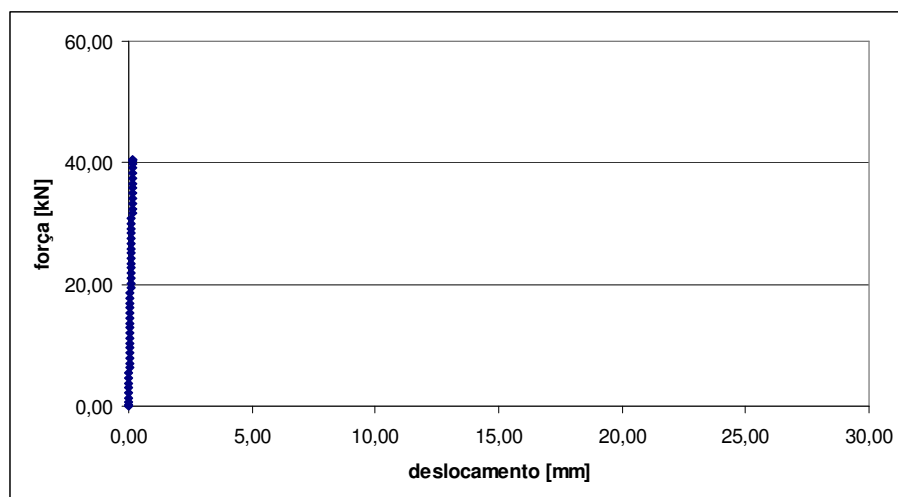


Figura 4.21 – Resultado da curva força-deslocamento do modelo em ANSYS

O resultado da curva força-deslocamento da modelação da placa circular simplesmente apoiada em ABAQUS, está representada na Figura 4.22. O resultado médio do modelo numérico é a curva que se apresenta em traço contínuo negro.

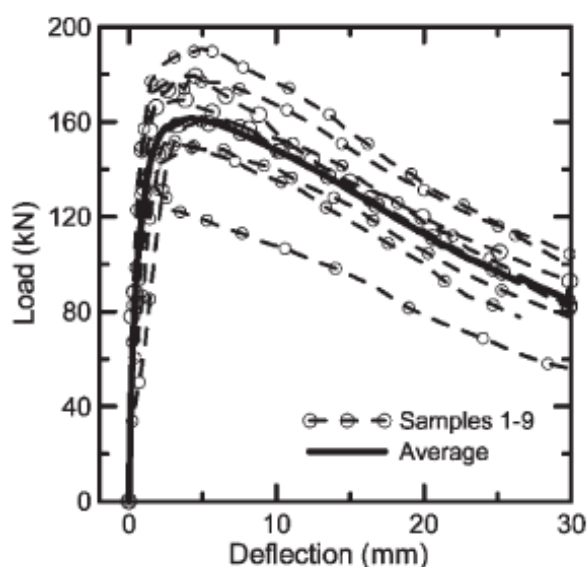


Figura 4.22 – Resultado da curva de força-deslocamento do modelo em ABAQUS [4]

Na curva obtida no modelo efectuado em ANSYS, há que considerar o facto da utilização somente do betão simples, ao invés do betão reforçado utilizado no modelo em ABAQUS. Assim, visto que a resistência do betão à tracção é diminuta, é natural que a rotura do material tenha sido mais frágil no caso da análise do modelo em ANSYS, e portanto a comparação dos resultados basear-se-á apenas no declive da zona elástica do material.

Os declives de ambas as curvas na zona elástica são idênticos, no entanto, o modelo da placa circular simplesmente apoiada realizado no software ANSYS atinge a rotura numa fase anterior. Quando a carga corresponde a 40 kN, surgem as primeiras fendas e a rotura do material nesse modelo. O modelo ABAQUS apresenta uma fase elástica mais extensa, visto que a fendilhação inicial é atenuada pelas fibras de aço que aumentam a ductilidade do material.

A conclusão do documento indica que o software ABAQUS é uma ferramenta credível para a obtenção dos parâmetros dos materiais ensaiados, e consequentemente fornece resultados fiáveis. Pode concluir-se que o modelo desenvolvido com o software ANSYS também é uma ferramenta credível para a modelação de ensaios, considerando a relação possível entre os dois softwares.

4.4. Obtenção dos Parâmetros do Material Calda de Cimento-bentonite com base na modelação numérica

Para a obtenção dos parâmetros do material calda de cimento-bentonite, é simulado o ensaio da placa circular com modo de rotura imposto, referido no ponto 4.2 e comparado com os resultados obtidos num ensaio desenvolvido no LNEC descrito no capítulo anterior. Os parâmetros são alterados iterativamente até se atingir uma aproximação razoável entre as curvas força-deslocamento do ensaio e do modelo.

A curva força-deslocamento obtida no ensaio, para uma placa circular com modo de rotura imposto apresenta-se na Figura 4.23. No entanto para a obtenção dos parâmetros resistentes da calda deve considerar-se apenas a fase elástica dessa curva, que se apresenta com a respectiva linha de tendência na Figura 4.24.

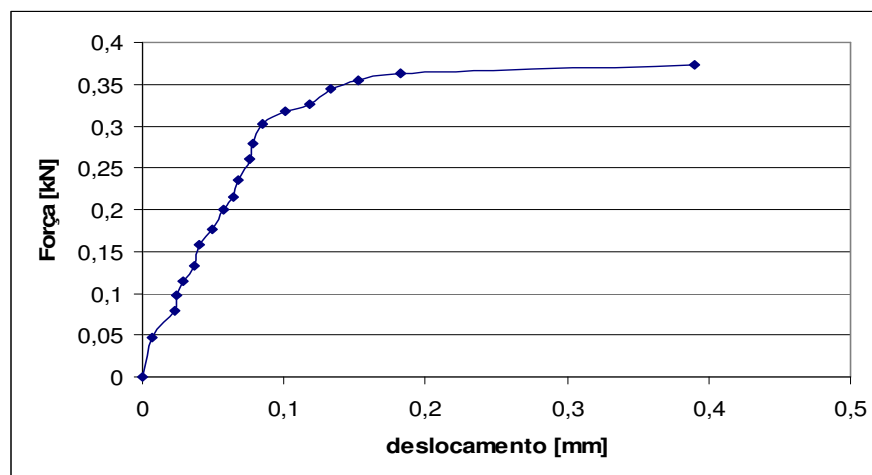


Figura 4.23 – Curva força-deslocamento de placa circular com modo de rotura imposto ensaiada no LNEC

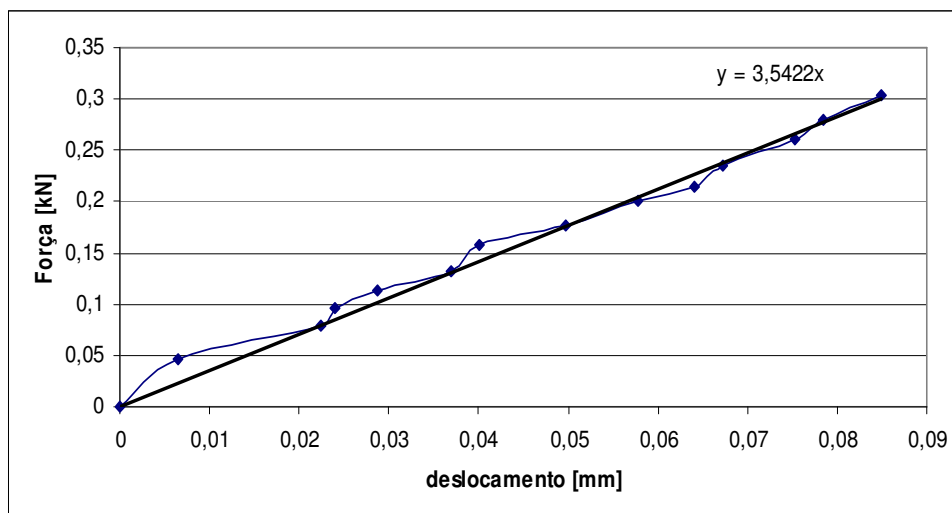


Figura 4.24 – Curva força-deslocamento da fase elástica da placa com modo de rotura imposto ensaiada no LNEC

Como **primeira iteração** criou-se um modelo com os seguintes parâmetros do material:

- Resistência à tracção, $f_t = 1,89$ MPa;
- Resistência à compressão, $f_c = 5,7$ MPa;
- Módulo de elasticidade, $E = 1800$ MPa;
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,2$;
- Coeficientes de transferência de tensões ao corte, $\beta = 0,2$.

Os valores resistentes utilizados na primeira iteração para a resistência à compressão, tracção e módulo de elasticidade são os obtidos nos ensaios realizados no LNEC.

Como se pode verificar pelo gráfico da curva força-deslocamento da primeira iteração do modelo, cf. Figura 4.25, o declive da curva é bastante inferior ao declive da curva obtida experimentalmente. A rotura do provete do modelo apresenta também menores valores de deslocamento ao centro, e uma carga aplicada superior. Para calibrar o comportamento do material devem ser ajustados os parâmetros do material, e como tal obtém-se por aproximação essas características através da modelação.

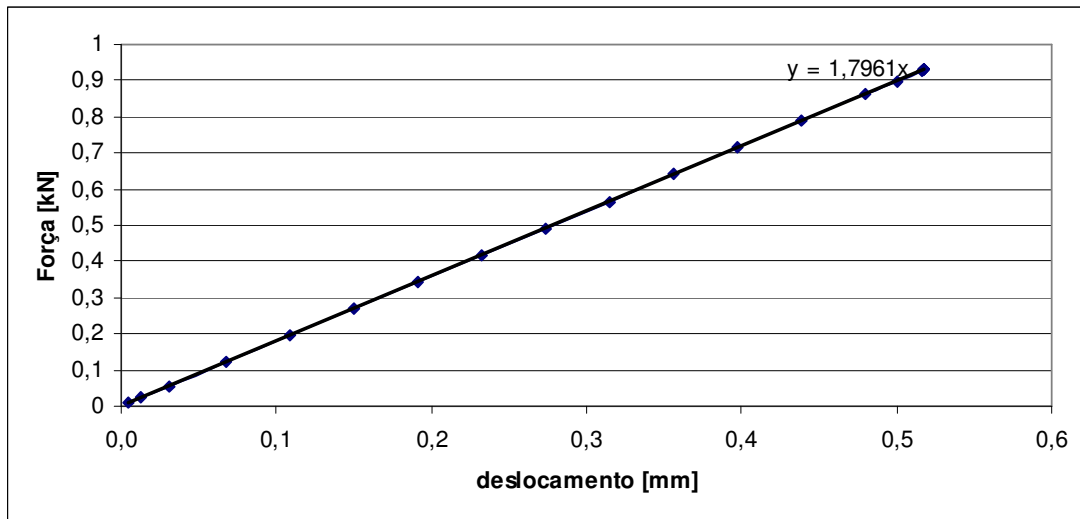


Figura 4.25 – Curva força-deslocamento da primeira iteração do modelo de uma placa circular com modo de rotura imposto

4.4.1. Módulo de Elasticidade

O Módulo de Elasticidade do material governa o declive da curva força-deslocamento. Assim, para obter uma estimativa deste parâmetro para o material ensaiado, faz-se uma relação linear entre os declives das curvas força-deslocamento da primeira iteração do modelo e do ensaio, cf. equação 10.

$$E_{\text{iteração2}} = \frac{\text{declive curva ensaio}}{\text{declive curva iteração1}} \times E_{\text{iteração1}} \quad (10)$$

Assim, o valor do Módulo de Elasticidade utilizado na **segunda iteração** obtido pela equação 7, é aproximadamente igual a 3517 MPa.

Pode ser verificada a relação de declives entre as curvas da primeira iteração e do ensaio na Figura 4.26.

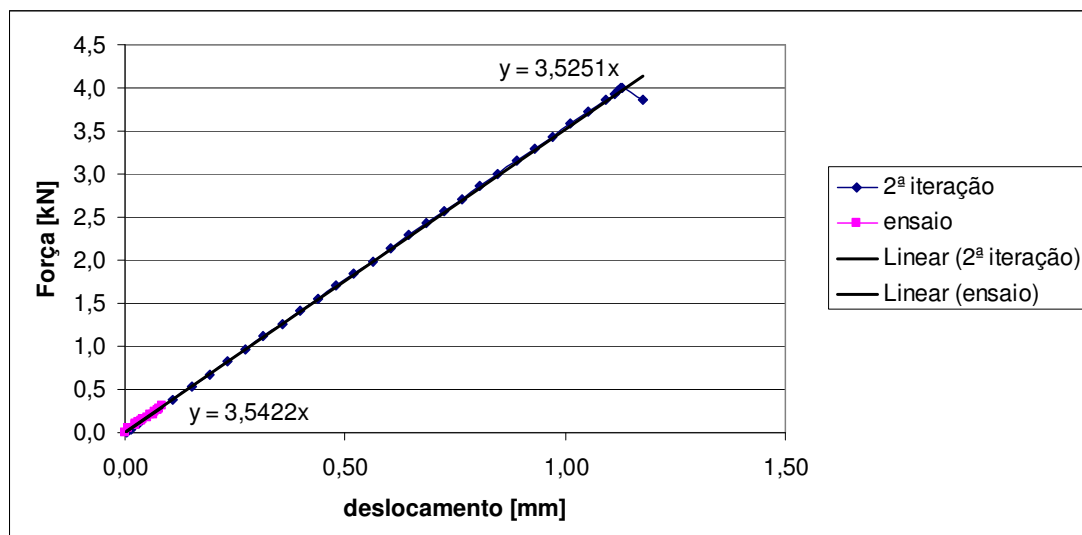


Figura 4.26 – Curva força-deslocamento da segunda iteração do modelo de uma placa circular com modo de rotura imposto

Como se pode verificar pelo resultado da segunda iteração, o declive da curva força-deslocamento apresenta uma relação muito aproximada com o declive obtido no resultado do ensaio.

4.4.2. Resistência à Tracção

A resistência à tracção do provete tem muita influência no comportamento do provete e por conseguinte na curva força-deslocamento, visto tratar-se de um ensaio indirecto à tracção. Esta resistência deve ser diminuída em relação às iterações anteriores, de forma a reduzir os valores da força aplicada e do deslocamento ao centro.

Tentando obter uma estimativa da resistência à tracção para a **terceira iteração**, tenta-se novamente fazê-lo através de uma relação linear, mas desta vez baseada nos valores da força máxima da primeira iteração e do ensaio, cf. equação 11.

$$f_{,iteração3t} = \frac{\text{deslocamento máximo ensaio}}{\text{deslocamento máximo iteração 2}} \times f_{t,iteração2} \quad (11)$$

Utilizando os parâmetros do material da segunda iteração, alterando apenas a resistência à tracção obtida pela equação 11, igual a 142 kPa, obtém-se a curva força-deslocamento que se apresenta na Figura 4.27.

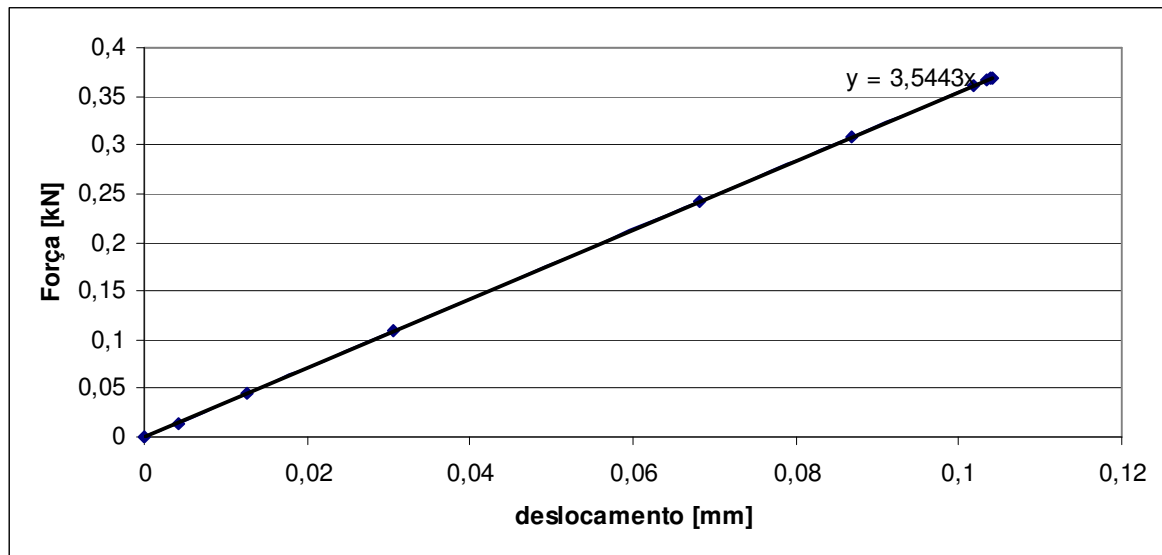


Figura 4.27 – Curva força-deslocamento da terceira iteração do modelo de uma placa circular com modo de rotura imposto

4.4.3. Comparação dos Resultados

A Figura 4.28 apresenta a sobreposição das curvas força-deslocamento da terceira iteração do modelo em ANSYS e do ensaio realizado no LNEC, sobre uma placa circular com modo de rotura imposto.

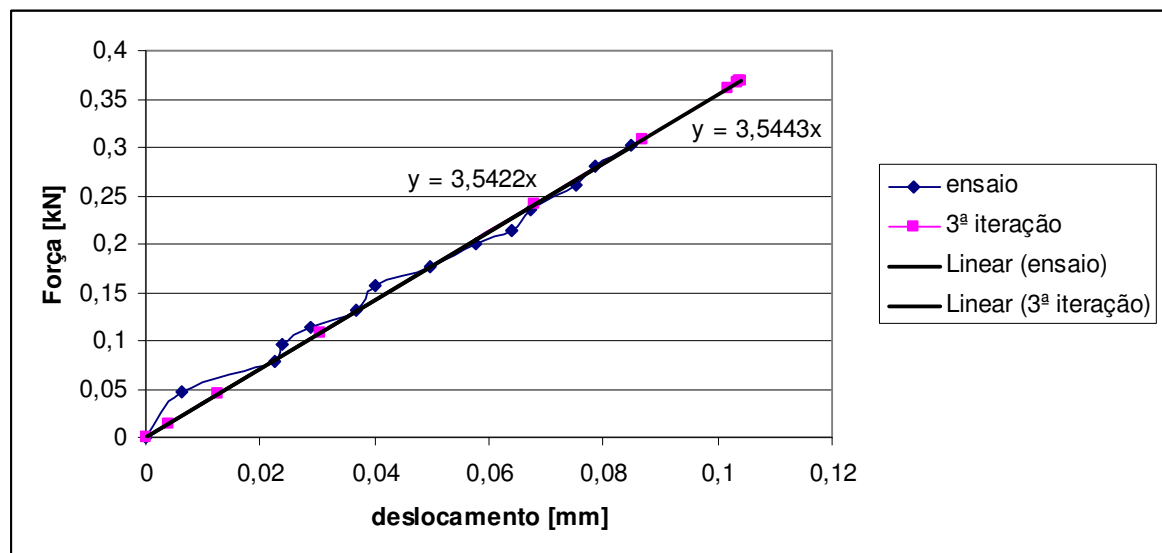


Figura 4.28 – Curvas força-deslocamento ensaiada e do modelo

Os valores dos declives das curvas, das forças máximas aplicadas e dos deslocamentos máximos ao centro, bem como os erros associados estão indicados no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Erros associados à modelação numérica comparativamente com os resultados práticos

	Ensaio	Modelo	Erro associado [%]
Declive da curva força-deslocamento	3,5422	3,5443	0,06
Força Máxima [kN]	0,3029	0,3690	17,91
Deslocamento Máximo [mm]	0,0849	0,1040	18,37

Os valores do módulo de elasticidade e da resistência à tracção da calda obtidos por integração numérica apresentam erros significativos quando comparados com os valores obtidos nos ensaios referidos no capítulo 3. O módulo de elasticidade apresenta-se como uma boa estimativa, em que o erro associado pode ser causado por diferentes tipos de ensaio/condições. Quanto ao valor da resistência à tracção, o seu valor é pouco consistente dada a possibilidade do material colapsar antes fendilhar ou esmagar, devido aos elementos Solid65 utilizados em ANSYS poderem assumir um comportamento governado pelo critério de Drucker-Prager.

O resumo dos parâmetros do material ensaiado é:

- Módulo de Elasticidade, $E = 3517 \text{ MPa}$;
- Coeficiente de Poisson, $\nu = 0,2$;
- Resistência à tracção, $f_t = 1,162 \text{ MPa}$ (valor obtido pelo ensaio de tracção aos 7 dias);
- Resistência à compressão, $f_c = 5,7 \text{ MPa}$.

5. AS INJEÇÕES DE COMPENSAÇÃO NO CONTROLO DA SUBSIDÊNCIA

5.1. A subsidência na escavação dos túneis. Métodos de análise

A ausência de confinamento devida à escavação para a construção de túneis provoca a redistribuição de tensões em torno da secção escavada e deformações. É definida como convergência de um túnel – u – o deslocamento relativo entre dois pontos diametralmente opostos situados na sua parede. A convergência é dependente da distância à frente da escavação, do tempo dispendido desde o início da escavação e a zona onde se escava, da distância não revestida até a zona onde se escava e da rigidez axial do revestimento [17].

A utilização de revestimentos nas paredes do túnel, reduz a sua convergência pela mobilização duma pressão reactiva com sentido oposto àquela causada pela escavação. A pressão desenvolvida pelo suporte depende da rigidez axial e da resistência do material.

O método da convergência-confinamento ou método das curvas características, pretende simular os efeitos tridimensionais da abertura de um túnel por análises em deformação plana [17]. Este método consiste na aplicação de uma tensão nas paredes do túnel não revestido, igual a:

$$p = (1 - \lambda)\sigma_0 \quad (12)$$

Sendo λ o coeficiente de desconfinamento (variando entre 0 e 1, sendo 0 na frente de escavação e igual a 1 para o túnel não revestido) e σ_0 a tensão inicial do maciço ao nível do eixo do túnel.

De acordo com este método, os comportamentos do maciço não suportado e do suporte podem ser representados num diagrama p - u , através das suas curvas características (cf. Figura 5.1).

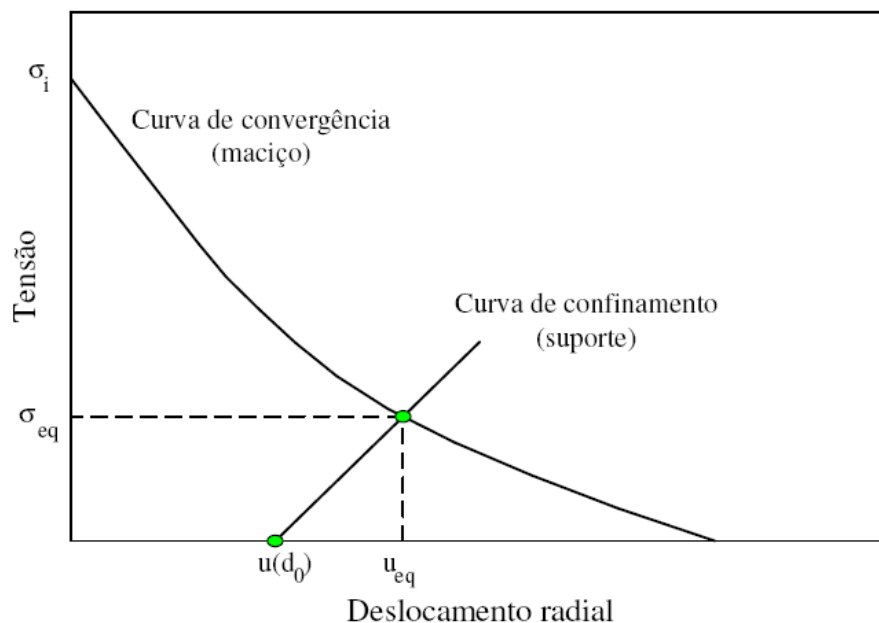


Figura 5.1 – Curva característica de um túnel [24]

Estas curvas permitem determinar a interação revestimento-túnel e tratar cada um deles como variáveis independentes, e a determinação dos deslocamentos e tensões aplicadas em cada um ou no conjunto.

Para solos granulares elasto-plásticos (não coesivos), considera-se que o solo plastifica numa zona entre o raio inicial do túnel r_0 e o raio de plastificação r_e (cf. Figura 5.2 e a equação 14). Na zona entre estes dois raios considera-se que o solo se encontra em regime plástico e que as tensões radial e circunferencial são dadas pela equação 13.

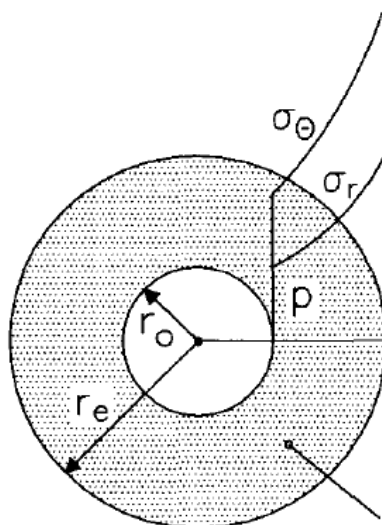


Figura 5.2 – Representação da zona de plastificação do terreno [17]

$$\sigma_e = \frac{2}{k_p + 1} \sigma_0 = p^* \quad (13)$$

$$r_e = r_0 \left(\frac{2}{k_p + 1} \cdot \frac{\sigma_0}{p} \right)^{\frac{1}{k_p - 1}} \quad (14)$$

Para $r_0=r_e$ obtém-se a pressão de plastificação que toma um valor igual àquele obtido pela equação 13, sendo k_p o coeficiente de impulso passivo, σ_0 a tensão do maciço ao nível do eixo do túnel e p^* a pressão de plastificação aplicada em todo o contorno do túnel.

Assim, para a determinação da curva característica para solos granulares, o ponto que define a fronteira entre a zona elástica e plástica é determinado através das equações 13 e 14.

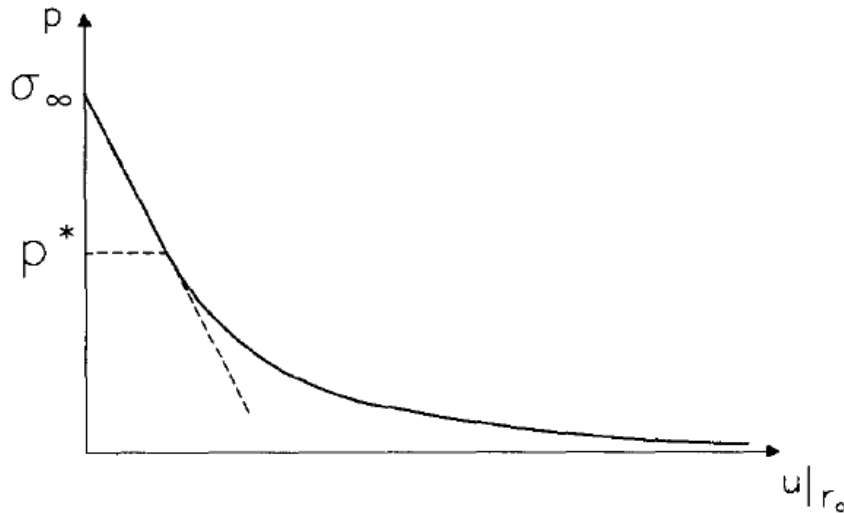


Figura 5.3 – Curva característica representativa com indicação da pressão de plastificação

Nas zonas em que $p < p^*$ e $p > p^*$ (cf. Figura 5.3) a curva é definida pelos deslocamentos dados pelas equações 15 e 16, respectivamente.

$$u(r_0) = r_0 \frac{\sigma_0}{2G} \operatorname{sen} \varphi \left(\frac{2}{k_p + 1} \cdot \frac{\sigma_0}{p} \right)^\alpha, \quad \alpha = \frac{2 - \operatorname{tg} \psi}{(k_p - 1) \cdot (1 - \operatorname{tg} \psi)} \quad (15)$$

$$u(r_0) = \frac{r_0 \cdot \sigma_0}{2G} \left(1 - \frac{p}{\sigma_0} \right) \quad (16)$$

Em que G representa o módulo de distorção do terreno

A subsidência é o efeito superficial, traduzido pelos assentamentos verificados aquando da construção de um túnel. Este é definido como sendo o volume de assentamento por unidade de comprimento de um túnel, segundo *Peck*, e pode ser aproximado pela curva de Gauss invertida [21].

O objectivo das injeções de compensação é contrariar o efeito superficial da escavação através da aplicação duma pressão ao longo dum arco de furos de injeção situados entre a galeria e a superfície.

Dependendo do tipo de terreno e da cobertura relativa do túnel, assim poderá ser necessário efectuar um tratamento prévio de consolidação ao terreno com injeção de caldas de cimento ou de cimento-bentonite.

O caso de estudo que se desenvolve neste Capítulo pretende simular o processo de tratamento de terrenos por injeção de compensação durante o alívio de tensões devido à escavação de um túnel.

5.2. O caso de estudo

5.2.1. Modelo

O *software PLAXIS v.8* é o programa utilizado na criação do modelo que se descreve.

O modelo é constituído por um perfil arenoso com dois estratos – Areia 1 e Areia 2. O estrato de areia mais superficial (Areia 2) tem 13 m de espessura, enquanto o estrato de areia mais profunda (Areia 1), onde será escavado um túnel com 9m de diâmetro e a uma profundidade relativa de 20 m, tem 20 m de espessura.

O trapézio representado na Figura 5.4 no interior do estrato de Areia 2, é utilizado como simulação de um melhoramento do terreno por consolidação, considerando para essa zona o solo Areia 3. No entanto, será também calculado um modelo em que este melhoramento não existe, e nesse caso esta zona está preenchida com Areia 2.

Existe um arco que também se encontra representado na Figura 5.4, que indica a zona de injeção (compensação) de calda para minimizar os assentamentos à superfície. Este arco está preenchido no seu interior pelo solo que o envolve (Areia 2),

As propriedades das Areias 1, 2 e 3 estão indicadas no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 – Propriedades do terreno

	Areia 1	Areia 2	Areia 3
Modelo	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Tipo	Drenado	Drenado	Drenado
γ [kN/m ³]	17,0	16,5	18,5
γ_{sat} [kN/m ³]	21,0	20,0	22,0
k_h [m/s]	$6,0 \times 10^{-6}$	$12,0 \times 10^{-6}$	$1,0 \times 10^{-6}$
k_v [m/s]	0,5	1,0	$1,0 \times 10^{-6}$
E [kPa]	120000	80000	750993
ν	0,30	0,30	0,23
c [kPa]	1,0	1,0	30,0
ϕ [°]	33,0	31,0	35,0
ψ [°]	3,0	1,0	10,0
f_t [MPa]	-	-	1,162

A Areia 3 é um terreno constituído pela mistura de Areia 2 e calda, pelo que os parâmetros resistentes da Areia 3 são obtidos através dos resultados referidos no capítulo anterior em que f_t é o valor da resistência à tracção da calda aos 7 dias e o módulo de elasticidade é obtido através da equação 17.

$$E_{Areia3} = n \times E_{calda} + (1 - n) \times E_{Areia2} \quad (17)$$

em que n é a porosidade do solo $\left(n = \frac{e}{1 + e} \right)$ e e é a porosidade da Areia 2, tomada igual a 0,7, em correspondência com um estado medianamente denso a denso.

Para que fosse possível simular uma escavação controlada de um túnel foi necessário criar uma geometria aproximada da sua secção, que possibilitasse a aplicação de cargas normais a esta secção (cf. Figura 5.5). Adicionalmente, é também utilizado o método da contracção pela utilização de uma estrutura com rigidez axial e de flexão existente no programa utilizado, para comparar com os resultados obtidos pela aplicação da pressão. Os parâmetros a utilizar para a estrutura do túnel predefinida pelo programa estão indicados no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 – Propriedades do revestimento do túnel

	Revestimento do Túnel
Comportamento	Elástico
EA [kN/m]	$1,050 \times 10^7$
EI [kN.m²/m]	$1,072 \times 10^5$
Peso [kN/m/m]	8,75
d [m]	0,30
u	0,20

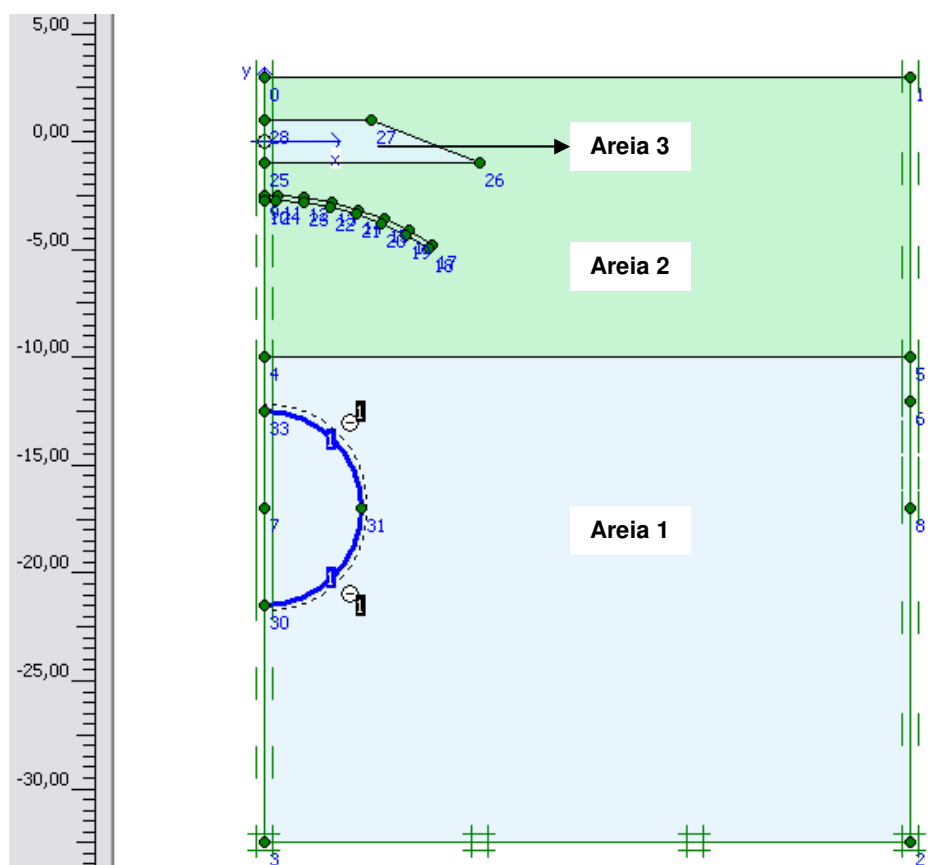


Figura 5.4 – Geometria do túnel com indicação dos estratos existentes

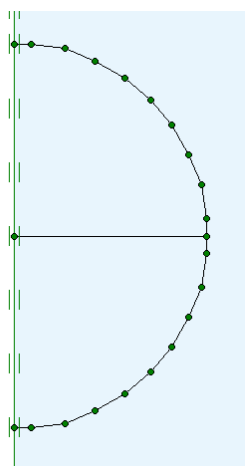


Figura 5.5– Geometria do furo para simulação do túnel por de aplicação de pressão normal

5.2.2. Processo de cálculo

São efectuados 5 cálculos, que em resumo estão indicados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Resumo de cálculos de injeção efectuados

Cálculo	Tipo de Cálculo
1	Método da contracção do túnel – Modelo com e sem Areia 3
2	Diminuição da pressão no túnel – Modelo sem Areia 3
3	Aumento da compensação no arco – Modelo com e sem Areia 3
4	Diminuição da pressão no túnel e aumento da pressão de compensação no arco (faseamento) – Modelo sem Areia 3
5	Diminuição da pressão no túnel e aumento da pressão de compensação no arco (faseamento) – Modelo com Areia 3

São considerados dois tipos de acção – injeção de calda e escavação do túnel.

Nos cálculos 1, 2 e 3 pretende determinar-se o comportamento do terreno para cada acção, tomando-a como variável independente, de forma a calibrar os valores das pressões a aplicar nos dois últimos cálculos. Nos cálculos 4 e 5, é calibrado o valor da pressão de injeção aplicada no arco, no decorrer da escavação do túnel, com base nas pressões calibradas nos três primeiros cálculos.

5.2.3. Fases de Cálculo

5.2.3.1. Cálculo pelo método da contracção

Para a utilização do método da contracção [22], considera-se que o revestimento do túnel se trata de uma estrutura tipo laje, sendo o seu comportamento definido pelas propriedades dos materiais que o constituem e que estão indicadas no Quadro 5.2. Para simular a perda de volume do túnel devido ao avanço da escavação, o programa de cálculo automático permite a utilização de um coeficiente de redução de volume – contracção. A contracção é definida como a razão entre a área de redução e a área total da secção do túnel.

No caso do nosso modelo são aplicadas contracções na estrutura do túnel entre 0 e 1%.

No Quadro 5.4 estão indicados os valores dos deslocamentos à superfície para alguns valores de contracções no túnel, dentro da gama de valores referida anteriormente.

Quadro 5.4 – Assentamentos superficiais nos vários pontos de medida para as contracções 0.125, 0.25, 0.5 e 1%: (a) sem Areia 3; (b) com Areia 3

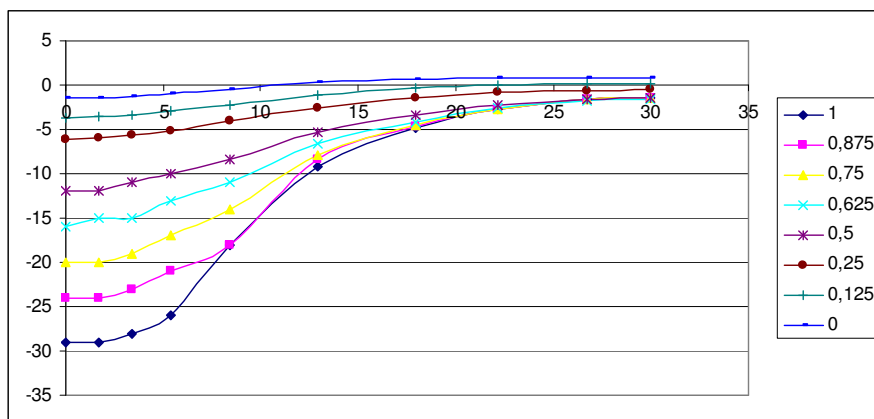
Coordenadas Horizontais [m]	0,00	1,69	3,42	5,36	8,41	12,91	17,96	22,16	26,73	30,00
Contracção (%)	Deslocamentos verticais [mm]									
1,000	-28,000	-27,000	-27,000	-25,000	-21,000	-9,052	-4,936	-2,874	-1,767	-1,546
0,500	-12,000	-12,000	-11,000	-10,000	-8,623	-5,340	-3,303	-2,232	-1,551	-1,410
0,250	-5,412	-5,812	-5,516	-5,022	-4,011	-2,533	-1,411	-0,895	-0,588	-0,539
0,125	-3,514	-3,473	-3,218	-2,854	-2,126	-1,103	-0,366	-0,057	0,101	0,127

(a)

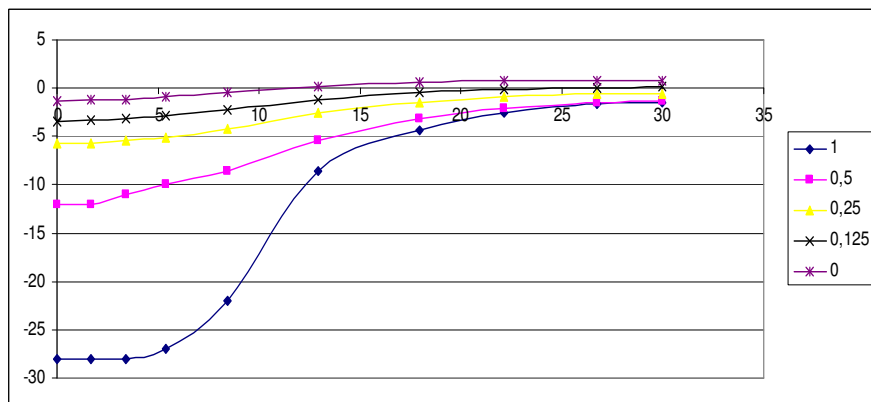
Coordenadas Horizontais [m]	0,00	1,69	3,42	5,36	8,41	12,91	17,96	22,16	26,73	30,00
Contracção (%)	Deslocamentos verticais [mm]									
1,000	-28,000	-28,000	-28,000	-27,000	-22,000	-8,611	-4,336	-2,592	-1,655	-1,480
0,500	-12,000	-12,000	-11,000	-10,000	-8,558	-5,352	-3,103	-2,121	-1,512	-1,392
0,250	-5,780	-5,700	-5,469	-5,073	-4,138	-2,561	-1,417	-0,908	-0,615	-0,565
0,125	-3,422	-3,367	-3,193	-2,903	-2,230	-1,135	-0,386	-0,079	0,078	0,104

(b)

Na Figura 5.6 estão representadas as bacias de subsidência correspondentes aos valores dos deslocamentos indicados, considerando o modelo com tratamento (com Areia 3) e sem tratamento (sem Areia 3) por consolidação.



(a)

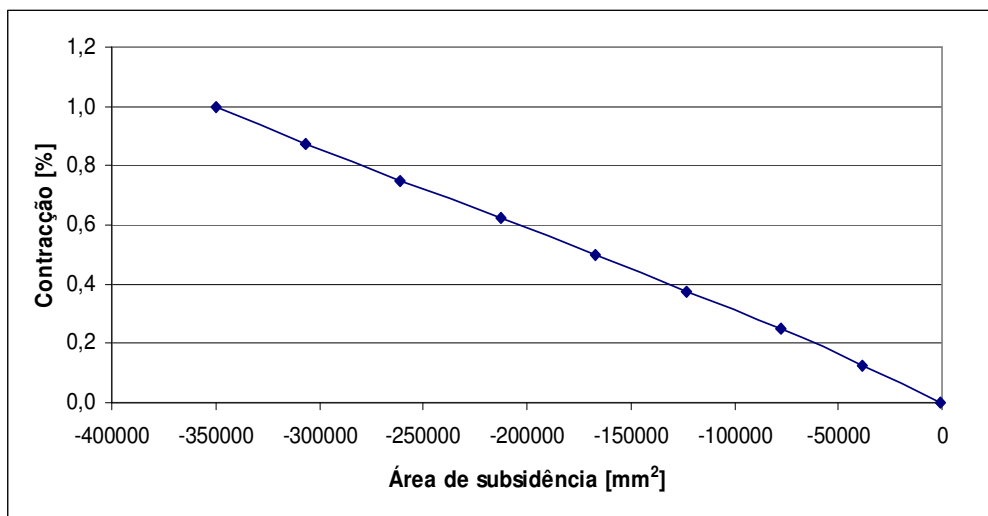


(b)

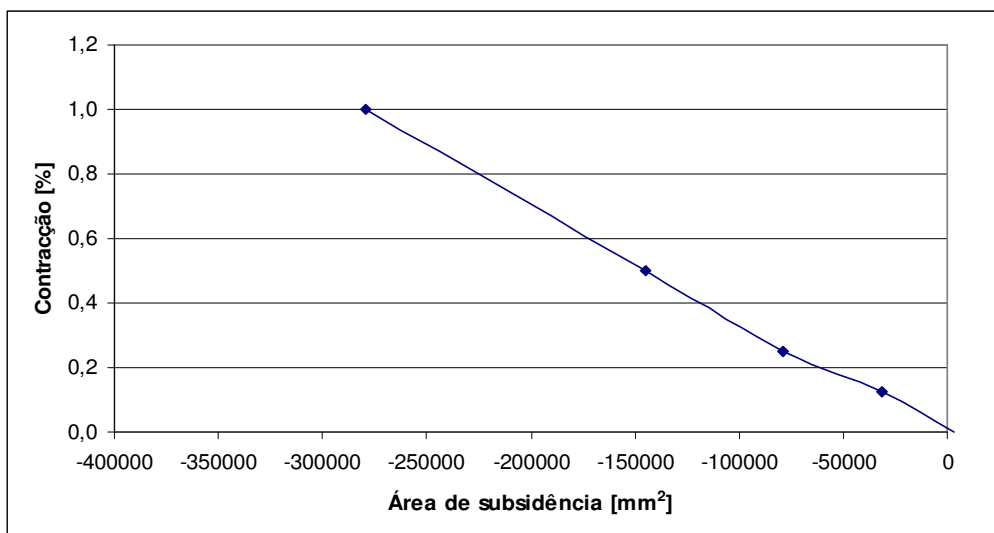
Figura 5.6 – Bacias de subsidência considerando os diversos valores de contracção do túnel: (a) sem Areia 3, (b) com Areia 3

A área de subsidência é calculada por integração numérica, através da regra dos trapézios. Para isso é definida uma função f (coordenadas horizontais) sendo f os deslocamentos verticais à superfície para os vários valores das coordenadas horizontais consideradas.

Ligando esses pontos através de troços rectos, pode calcular-se uma área aproximada, considerando as áreas dos trapézios formados pela união desses pontos. Na Figura 5.7 (a) e (b) estão representadas as áreas de subsidência em função dos valores de contracção do túnel, para os modelos com e sem tratamento.



(a)



(b)

Figura 5.7 – Gráficos contracção vs. Área de subsidência: (a) sem Areia 3, (b) com Areia 3

Pode verificar-se que as áreas de subsidência para o modelo com Areia 3 são inferiores às mesmas para o modelo sem Areia 3.

Nas Figura 5.8 e Figura 5.9 estão representados de forma gráfica e esquemática os deslocamentos verticais totais para os dois modelos (com e sem Areia 3) para as contracções do túnel de 0,5 e 1,0%, dado tratar-se de valores comuns de contracções para terrenos arenosos acima da superfície freática.

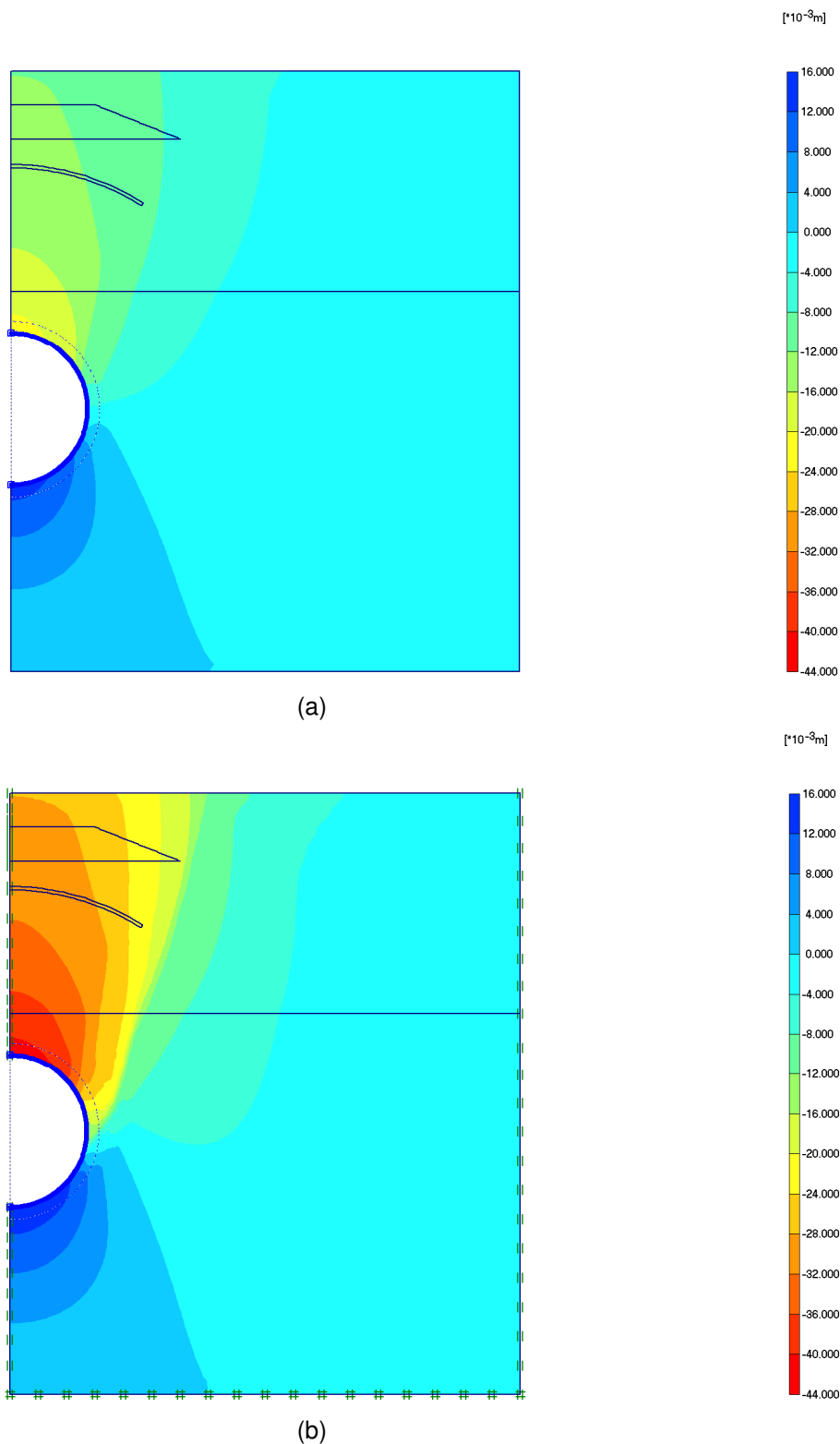
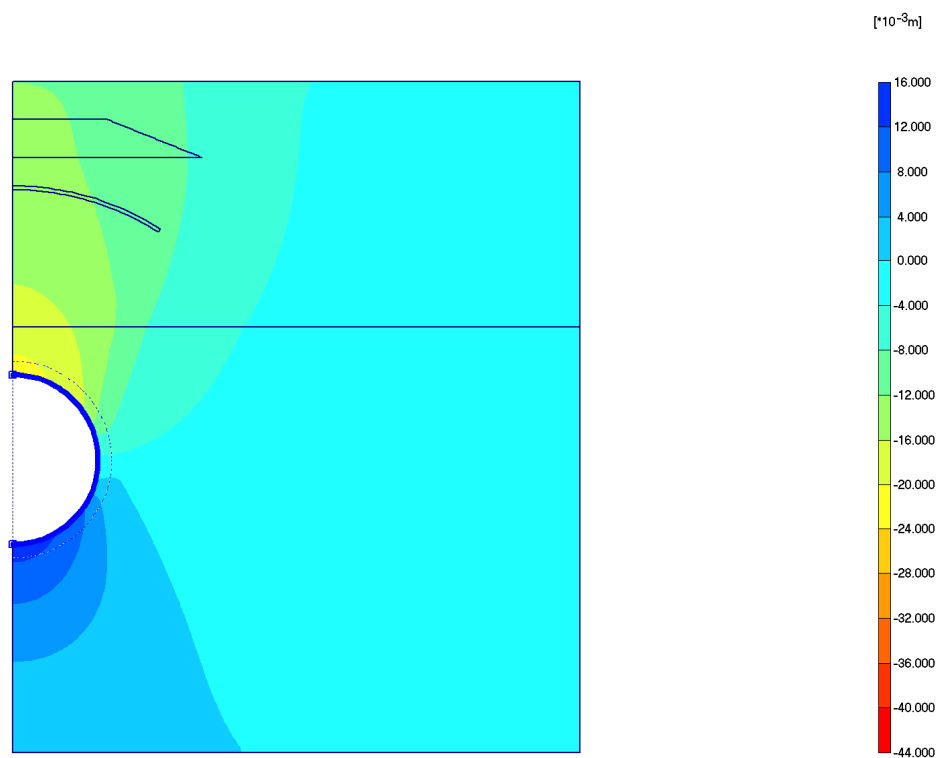
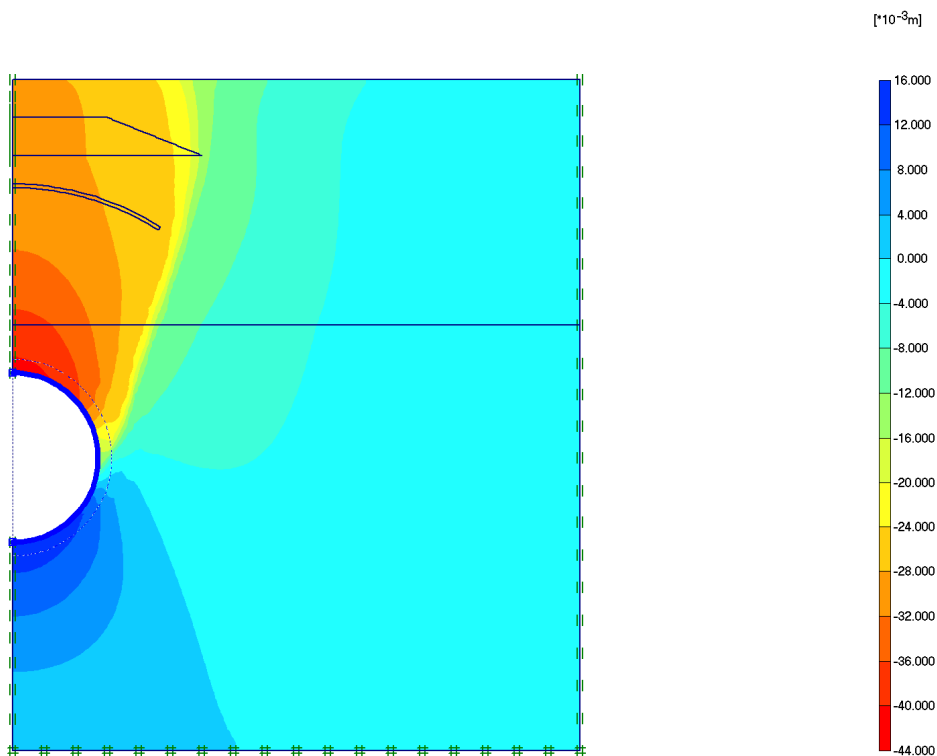


Figura 5.8 – Isolinhas de deslocamentos verticais para modelo sem Areia 3 e para as contracções: (a) 0,5% e (b) 1,0%



(a)



(b)

Figura 5.9 – Isolinhas de deslocamentos verticais para modelo com Areia 3 e para as contracções:
(a) 0,5% e (b) 1,0%

Da análise das Figura 5.8 e Figura 5.9, pode verificar-se a ocorrência de assentamentos mais acentuados para os modelos com contracções de 1,0% e que os assentamentos à superfície sobre o eixo do túnel, são ligeiramente superiores para o modelo com tratamento por consolidação.

Nas Figura 5.10 e Figura 5.11 estão representados de forma vectorial os deslocamentos totais das figuras anteriores para os dois modelos (com e sem tratamento) e para as contracções do túnel de 0,5 e 1,0%.

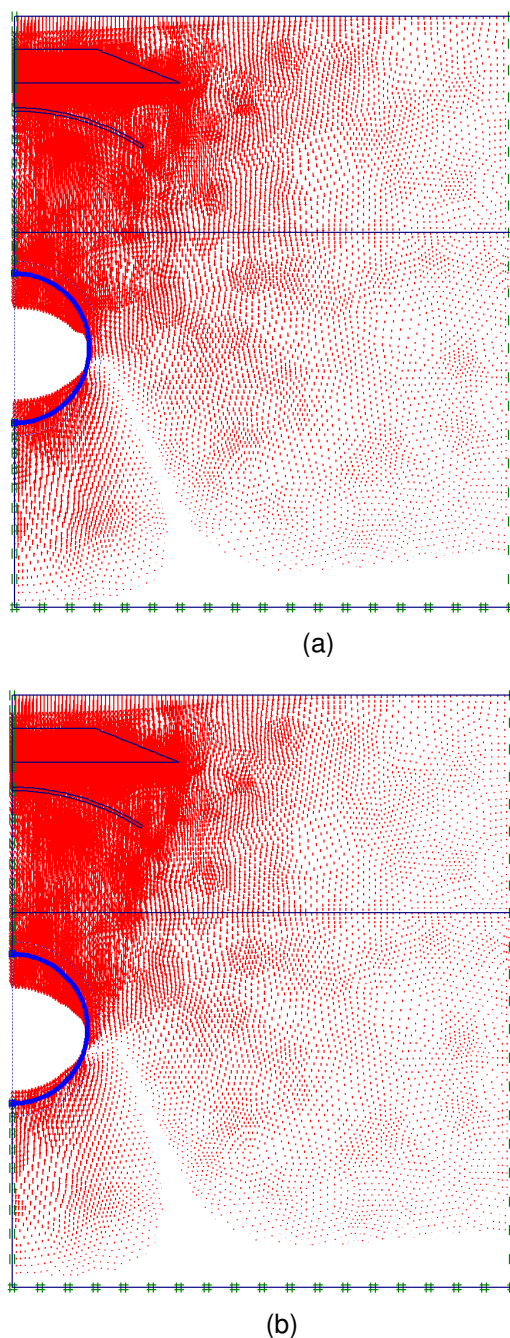
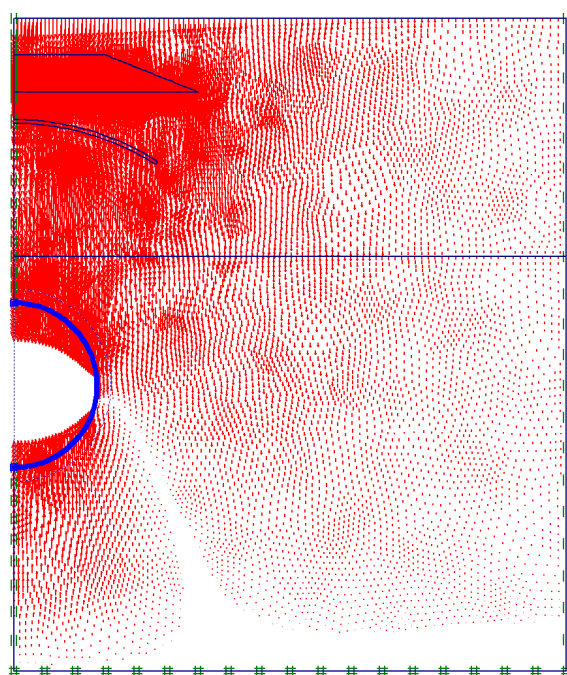
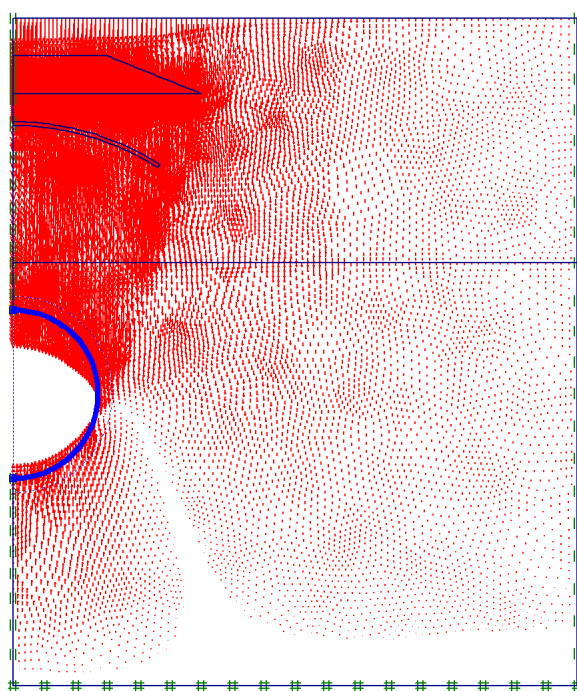


Figura 5.10 – Vectors de deslocamentos verticais para modelo sem Areia 3 e para as contracções: (a) 0,5% e (b) 1,0%



(a)



(b)

Figura 5.11 – Vectores de deslocamentos verticais para modelo com Areia 3 e para as contracções:
(a) 0,5% e (b) 1,0%

Os esforços axiais que se desenvolvem na estrutura do túnel para as contracções 0,5 e 1,0% do modelo sem tratamento estão representados na Figura 5.12, com valores máximos de -493,02 e -387,43 kN/m, respectivamente.

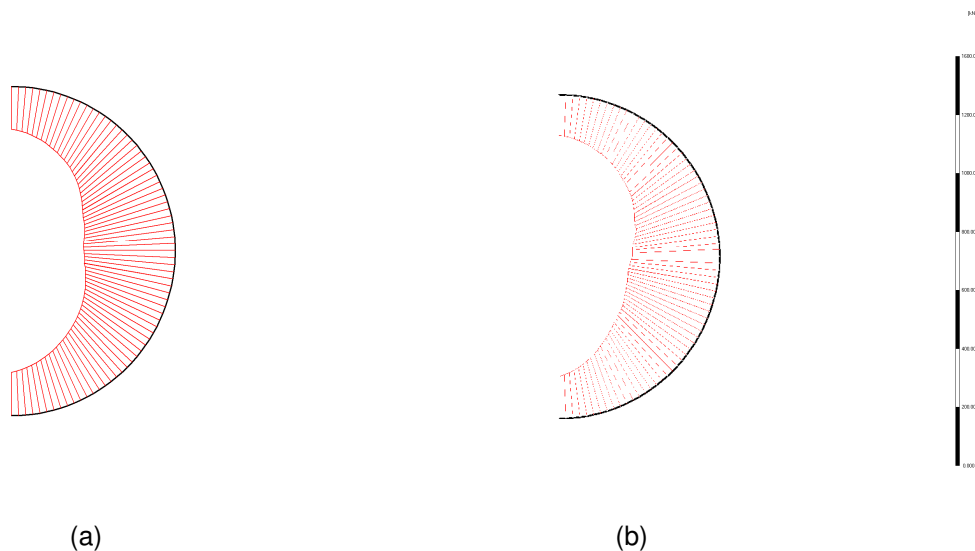


Figura 5.12 – Esforço axial no revestimento do túnel para o modelo sem Areia 3 e para contracções de (a) 0,5% e (b) 1,0 %

Os esforços axiais máximos na estrutura do túnel para o modelo com tratamento têm os valores de -497,55 e -395,16 kN/m para as contracções 0,5 e 1,0%, respectivamente, e estão representados na Figura 5.13.

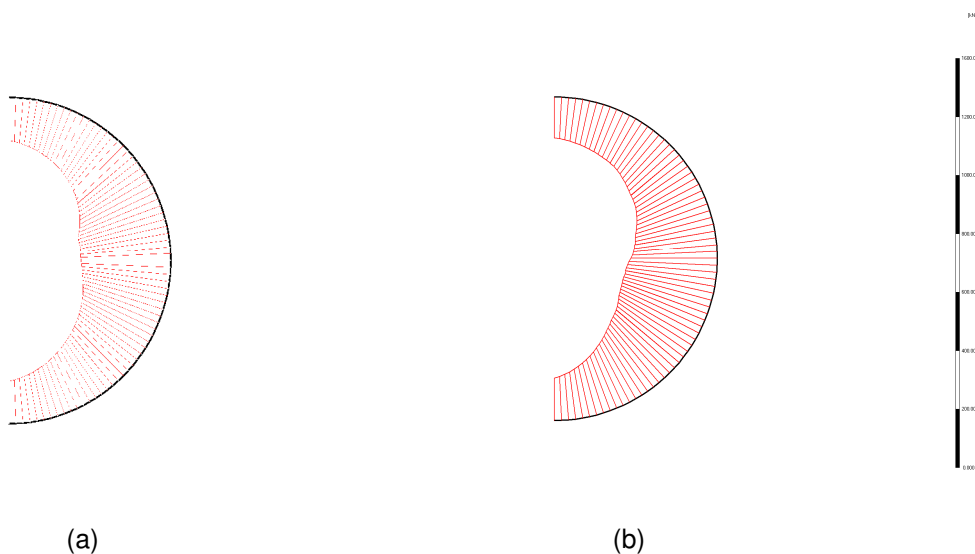


Figura 5.13 – Esforço axial no revestimento do túnel para o modelo com Areia 3 e para contracções de (a) 0,5% e (b) 1,0 %

Na Figura 5.14 estão representados os momentos flectores na estrutura do túnel para o modelo sem tratamento, para contracções de 0,5 e 1,0%. Os seus valores máximos são de -108,62 e -143,22 kN.m/m, respectivamente. Os mesmos esforços para o modelo com tratamento estão representados na Figura 5.14, com valores máximos de -108,63 kN.m/m para a contracção de 0,5% e -143,00 kN.m/m para a contracção de 1,0%.

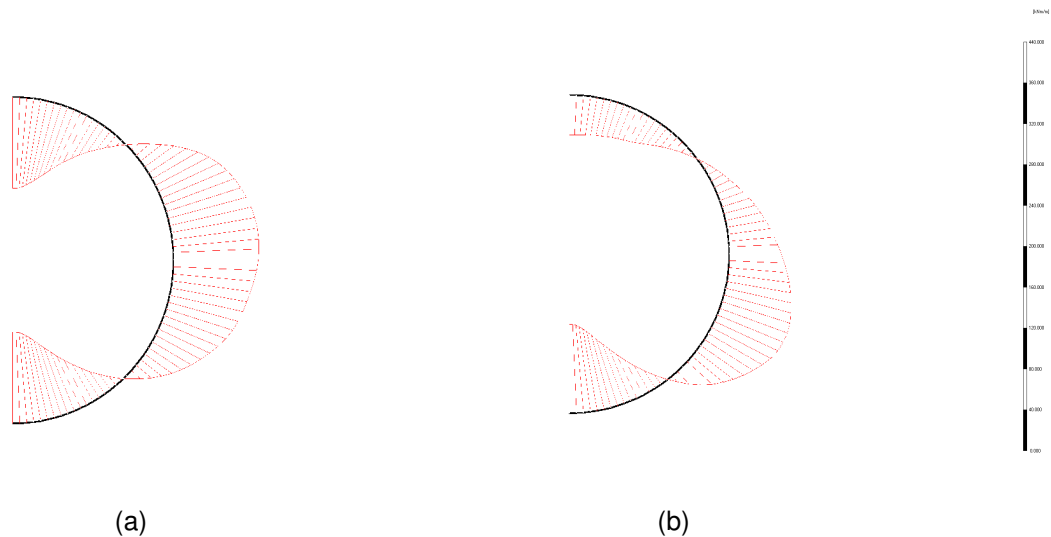


Figura 5.14 – Momento flector no revestimento do túnel para o modelo sem Areia 3 e para contracções de (a) 0,5% e (b) 1,0 %

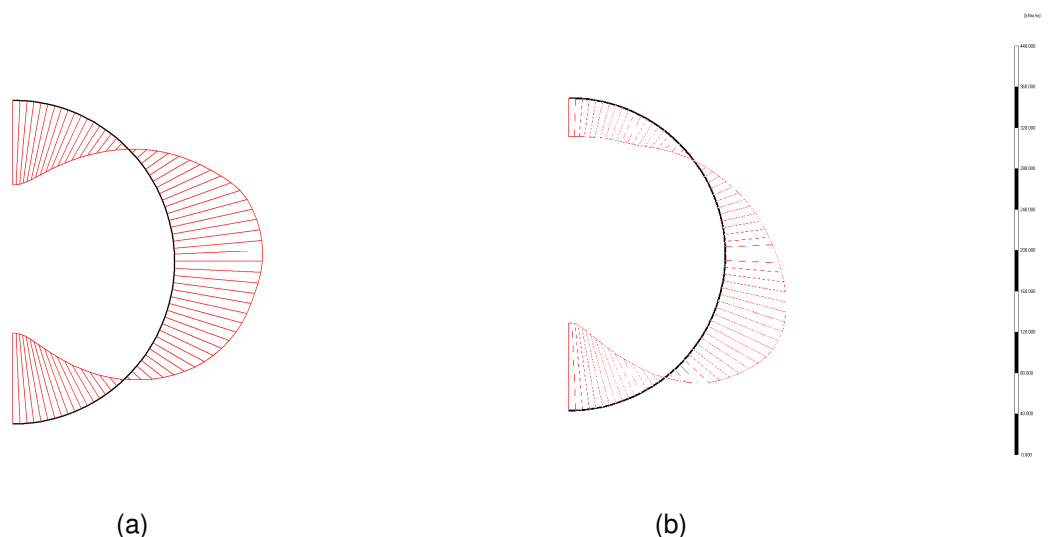


Figura 5.15 – Momento flector no revestimento do túnel para o modelo com Areia 3 e para contracções de (a) 0,5% e (b) 1,0 %

5.2.3.2. Cálculo pelo método da diminuição de pressão no túnel para o modelo sem Areia 3 (determinação da curva assentamento versus pressão na cavidade)

O método da diminuição da pressão do túnel é efectuado considerando uma pressão radial decrescente aplicada na face do túnel, com o intuito de simular o efeito da mobilização do suporte, permitindo fazê-lo de forma controlada em modelos computacionais. Tal permite que nas fases de cálculo subsequentes possa estimar-se qual a pressão de injeção a aplicar no arco durante o alívio de tensões verificado.

No cálculo pelo método da diminuição de pressão no túnel para o modelo sem Areia 3, considera-se uma aplicação de pressão radial mínima de 70kPa e máxima de 200kPa.

Os deslocamentos superficiais do terreno considerados para o modelo, e para as pressões normais aplicadas na secção escavada estão indicados no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 – Assentamentos superficiais nos vários pontos de medida para as diversas pressões aplicadas no túnel

Coordenadas Hor. [m]	0,00	1,69	3,42	5,36	8,41	12,91	17,96	22,16	26,73	30,00
Pressão	Deslocamentos verticais à superfície [mm]									
70	-21,000	-21,000	-20,000	-18,000	-12,000	-6,921	-3,876	-2,195	-1,305	-1,153
80	-16,000	-15,000	-15,000	-13,000	-9,987	-5,783	-3,235	-1,853	-1,122	-0,983
90	-10,000	-10,000	-9,824	-8,965	-7,171	-4,457	-2,564	-1,578	-0,971	-0,860
100	-8,925	-8,798	-8,369	-7,640	-6,123	-3,837	-2,151	-1,318	-0,799	-0,702
110	-7,980	-7,854	-7,456	-6,788	-5,397	-3,322	-1,789	-1,038	-0,588	-0,588
120	-7,283	-7,160	-6,782	-6,153	-4,842	-2,905	-1,488	-0,800	-0,298	-0,330
130	-6,664	-6,544	-6,184	-5,584	-4,344	-2,530	-1,208	-0,575	-0,218	-0,160
140	-6,114	-5,995	-5,650	-5,073	-3,489	-2,183	-0,946	-0,365	-0,046	0,007
150	-5,622	-5,507	-5,174	-4,618	-3,894	-1,865	-0,701	-0,166	0,118	0,162
160	-5,178	-5,066	-4,744	-4,204	-3,117	-1,568	-0,467	0,002	0,280	0,318
170	-4,791	-4,683	-4,369	-3,843	-2,791	-1,306	-0,256	0,200	0,428	0,465
175	-4,585	-4,478	-4,166	-3,645	-2,608	-1,154	-0,130	0,306	0,518	0,554
180	-4,399	-4,292	-3,985	-3,468	-2,445	-1,019	-0,199	0,398	0,600	0,633
185	-4,217	-4,112	-3,806	-3,295	-2,284	-0,886	-0,090	0,491	0,682	0,712
190	-4,036	-3,932	-3,629	-3,122	-2,124	-0,752	0,202	0,585	0,765	0,792
195	-3,857	-3,753	-3,452	-2,951	-1,964	-0,617	0,314	0,680	0,847	0,874
200	-3,680	-3,576	-0,276	-2,779	-1,803	-0,482	0,427	0,776	0,931	0,957

As bacias de subsidência resultantes para os diversos níveis de pressão no túnel estão apresentadas em forma gráfica na Figura 5.16, e as respectivas áreas de subsidência representadas na Figura 5.17.

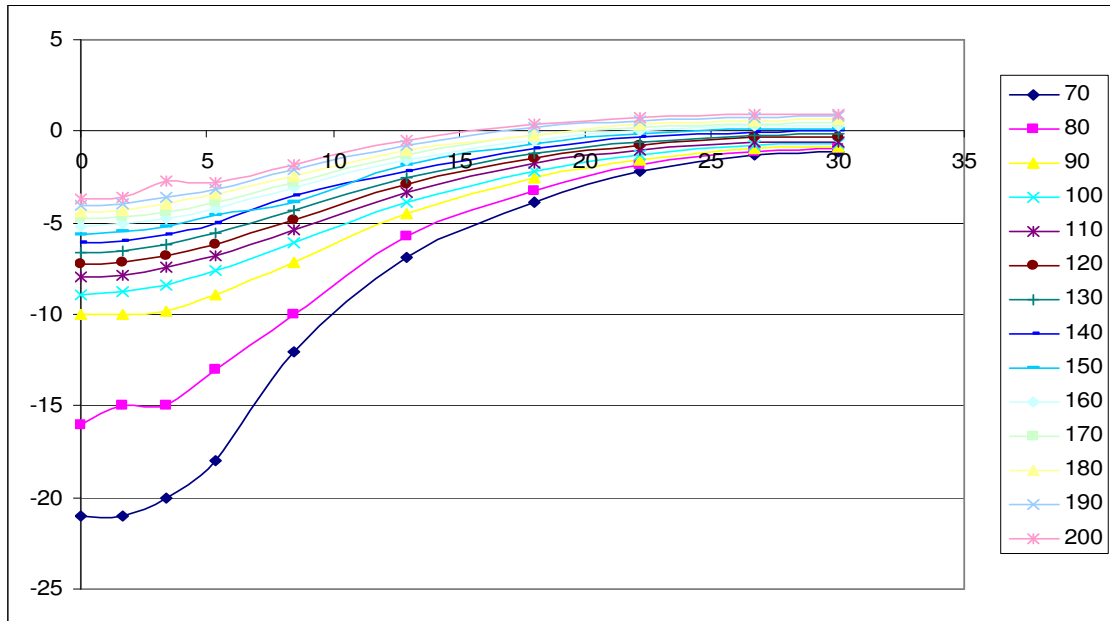


Figura 5.16 – Bacias de subsidência em função da pressão aplicada no túnel para o modelo sem Areia 3

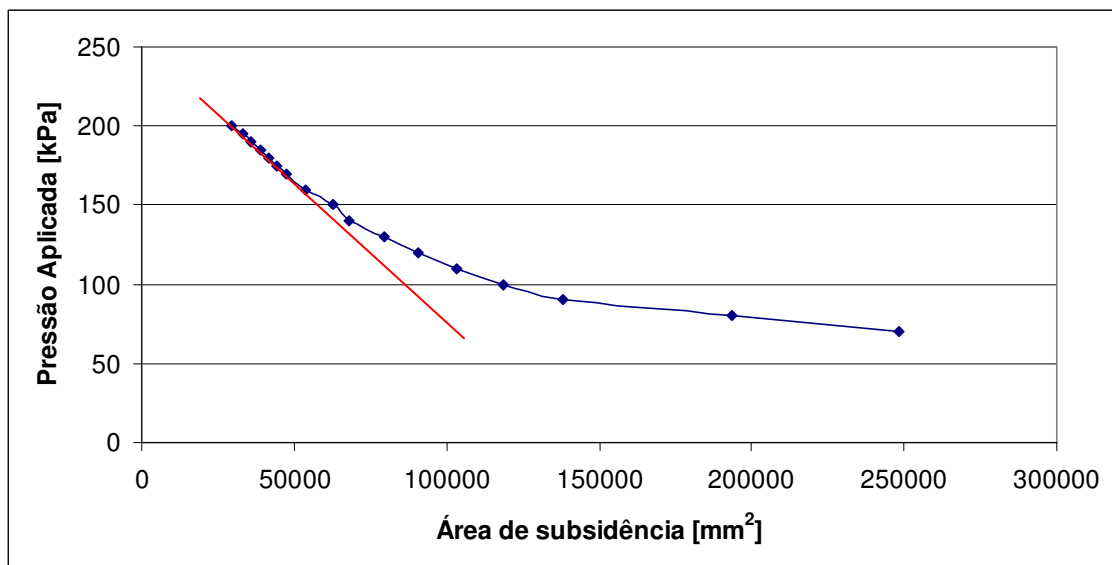


Figura 5.17 – Curvas de pressão aplicada no túnel vs. Área de subsidência para o modelo sem Areia 3

Da determinação dos valores do deslocamento superficial sobre o eixo do túnel para os valores de pressão normal aplicada pode ser realizada a curva representada na Figura 5.18.

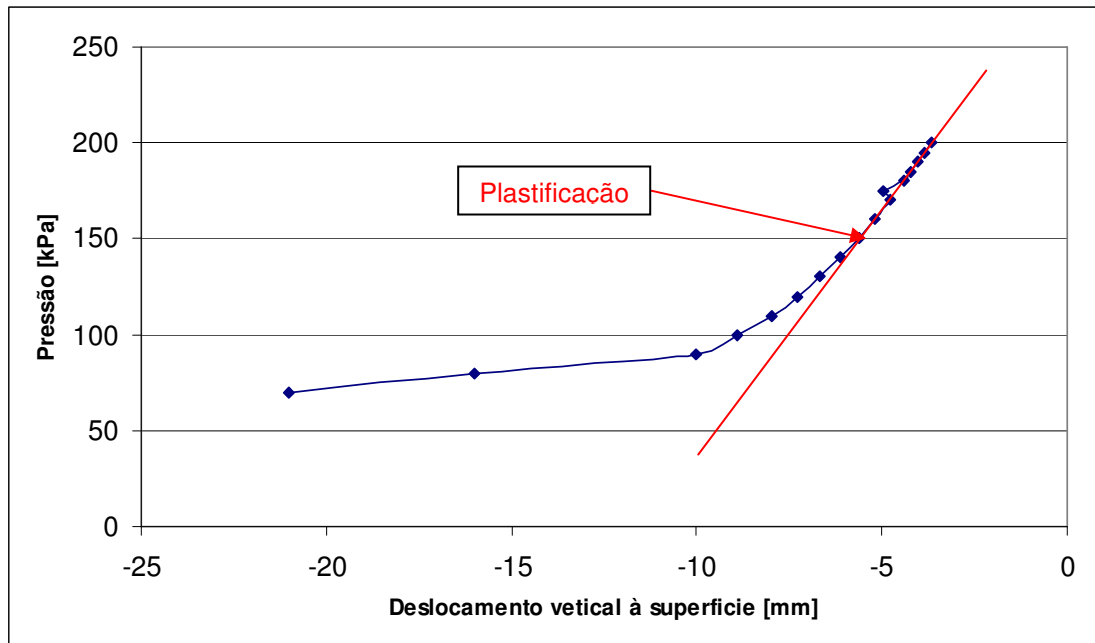


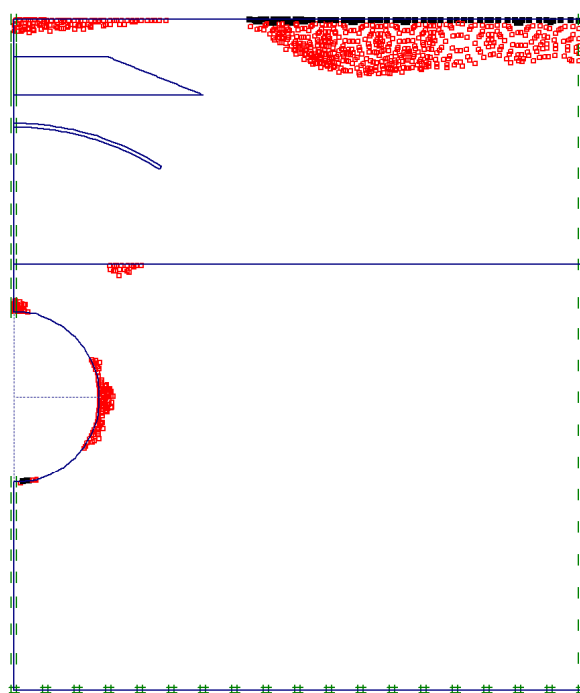
Figura 5.18 – Curvas pressão aplicada no túnel vs. deslocamento vertical à superfície sobre o eixo do túnel para o modelo sem Areia 3

Pode verificar-se da análise da Figura 5.18 a linearidade da curva pressão-deslocamento até uma pressão de cerca de 150kPa, onde ocorre o início da plastificação do terreno para pressões inferiores a este valor aplicadas na face do túnel.

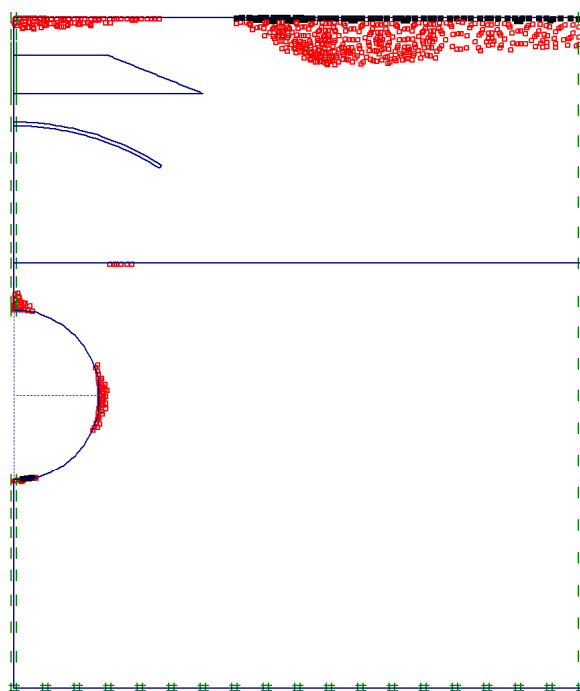
A pressão de início de plastificação em torno da cavidade pode ser calculada empiricamente pela equação 13 (ver Figura 5.17 e Figura 5.18), sendo:

$$\begin{aligned}\sigma_0 &= h_{\text{areia2}} \cdot \gamma_{\text{areia2}} + h_{\text{areia1,eixotúnel}} \cdot \gamma_{\text{areia1}} = \\ &= 13 \times 16,5 + 7 \times 17 = 333,5 \text{ kPa} \\ p^* &= \frac{2}{3,39 + 1} \times 333,5 = 152 \text{ kPa}\end{aligned}$$

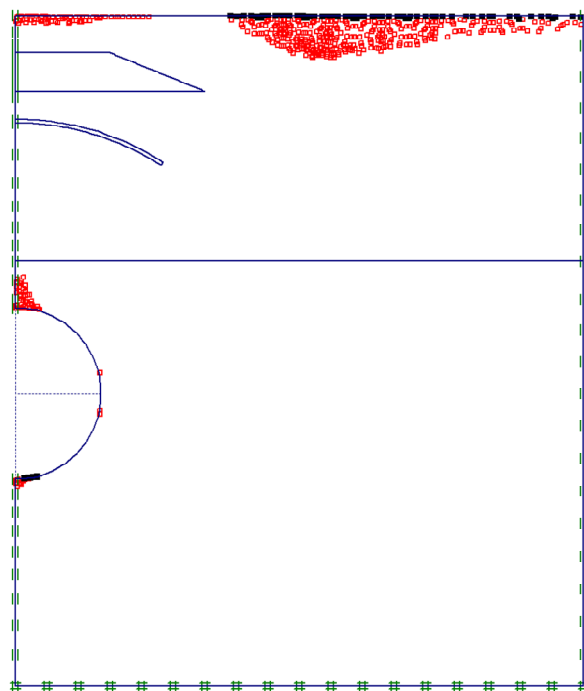
Na Figura 5.19 estão representados os pontos de plastificação no terreno encaixante, para as pressões 130 kPa (inferior à pressão de plastificação), 150 kPa (pressão de plastificação) e 180 kPa (superior à pressão de plastificação).



(a)



(b)



(c)

Figura 5.19 – Plastificação do terreno para a pressão (a) 130kPa; (b) 150kPa e (c) 180kPa

Verifica-se que para pressões inferiores a 150kPa os pontos de plastificação tendem a surgir em torno de toda a face do túnel, o que não ocorre para pressões superiores a esse valor.

5.2.3.3. Cálculo para o aumento da pressão de compensação no arco

No caso de aplicação da pressão no arco para simular a injeção de calda por compensação, essa pressão considera-se normal às faces do arco. O modelo sem Areia 3, admite uma gama de pressões entre os 70 e os 110 kPa e o modelo com Areia 3 entre 70 e 120 kPa. Para valores fora deste intervalo considera-se que o solo colapsa ou a solução não converge.

O Quadro 5.6 (a) e (b) indica os deslocamentos distribuídos em toda a superfície do terreno, em função da pressão aplicada no arco.

Quadro 5.6 - Assentamentos superficiais nos vários pontos de medida para as diversas pressões aplicadas no arco para o modelo: (a) sem Areia 3 e (b) com Areia 3

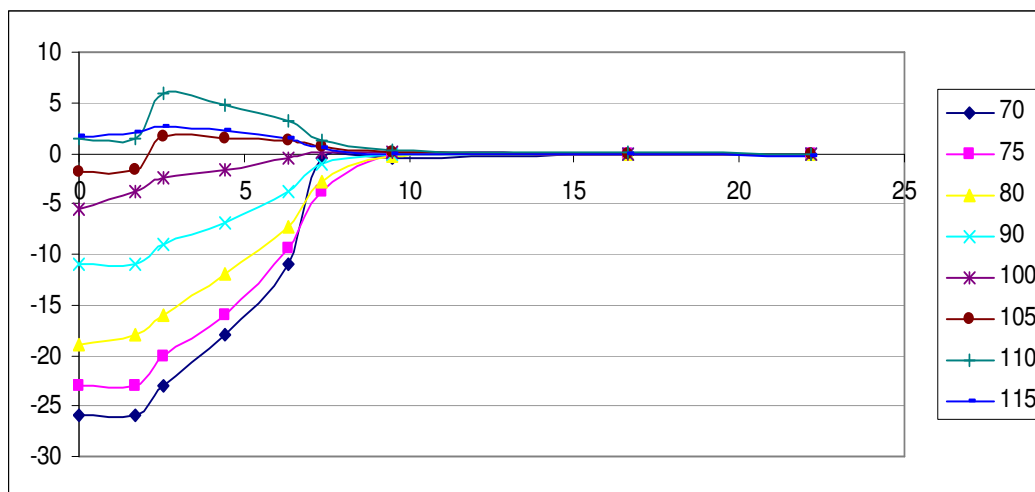
Coordenadas Hor. [m]	0,00	1,69	3,47	5,36	8,41	12,91	17,96	22,16	26,73	30,00
Pressão [kPa]	Deslocamentos verticais à superfície [mm]									
110	1,552	1,551	5,970	4,847	3,123	1,311	0,342	0,001	-0,167	-0,194
105	-1,822	-1,658	1,660	1,532	1,223	0,645	0,187	-0,040	-0,150	-0,174
100	-5,514	-3,828	-2,415	-1,644	-0,572	0,032	0,051	-0,050	-0,126	-0,143
90	-11,000	-11,000	-9,030	-6,802	-3,774	-1,145	-0,170	-0,105	-0,127	-0,135
80	-19,000	-18,000	-16,000	-12,000	-7,294	-2,771	-0,311	-0,155	-0,137	-1,401
75	-23,000	-23,000	-20,000	-16,000	-9,507	-3,823	-0,387	-0,161	-0,128	-0,128
70	-26,000	-26,000	-23,000	-18,000	-11,000	-0,438	-0,426	-0,173	-0,131	-0,130

(a)

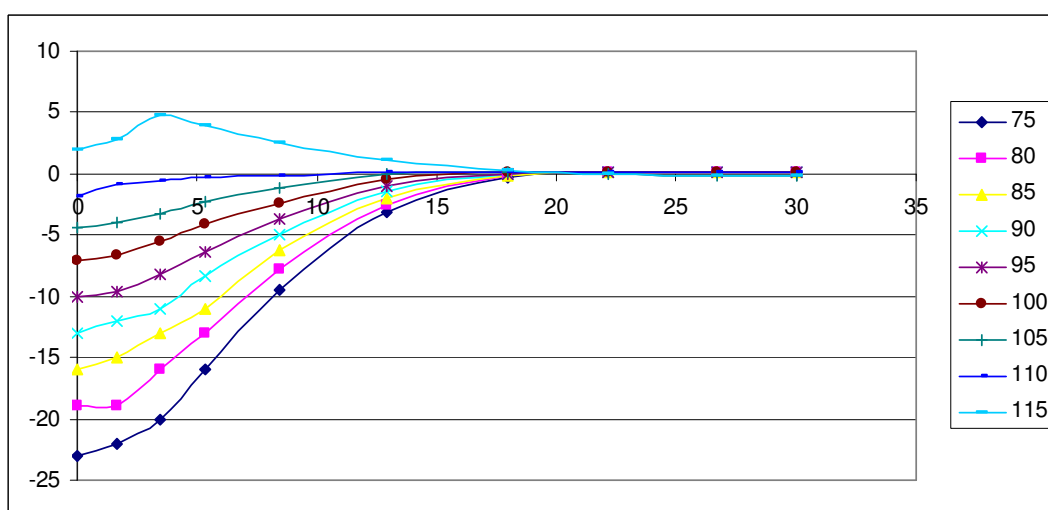
Coordenadas Hor. [m]	0,00	1,69	3,47	5,36	8,41	12,91	17,96	22,16	26,73	30,00
Pressão	Deslocamentos verticais à superfície [mm]									
120	2,399	2,615	2,851	2,237	1,388	0,564	0,178	0,068	0,032	0,027
115	2,054	3,100	4,832	3,916	2,566	1,159	0,326	-0,013	-0,174	-0,208
110	-1,408	-0,909	-0,399	-0,168	0,046	0,278	0,204	0,137	0,093	0,083
105	-4,347	-3,938	-3,107	-2,178	-1,133	-0,015	0,059	-0,024	-0,100	-0,117
100	-6,920	-6,574	-5,564	-4,175	-2,396	-0,415	0,112	0,158	0,141	0,135
95	-10,000	-9,797	-8,360	-6,543	-3,834	-1,069	0,000	0,110	0,115	0,111
90	-13,000	-13,000	-11,000	-8,510	-5,080	-1,572	-0,084	0,085	0,107	0,105
85	-16,000	-16,000	-14,000	-11,000	-6,427	-2,095	-0,161	0,064	0,103	0,104
80	-19,000	-19,000	-17,000	-13,000	-7,919	-2,683	-0,240	0,047	0,103	0,107
75	-24,000	-23,000	-21,000	-16,000	-9,611	-3,203	-0,286	0,057	0,128	0,132

(b)

As bacias de subsidência correspondentes aos deslocamentos verificados à superfície estão representadas na Figura 5.20.



(a)

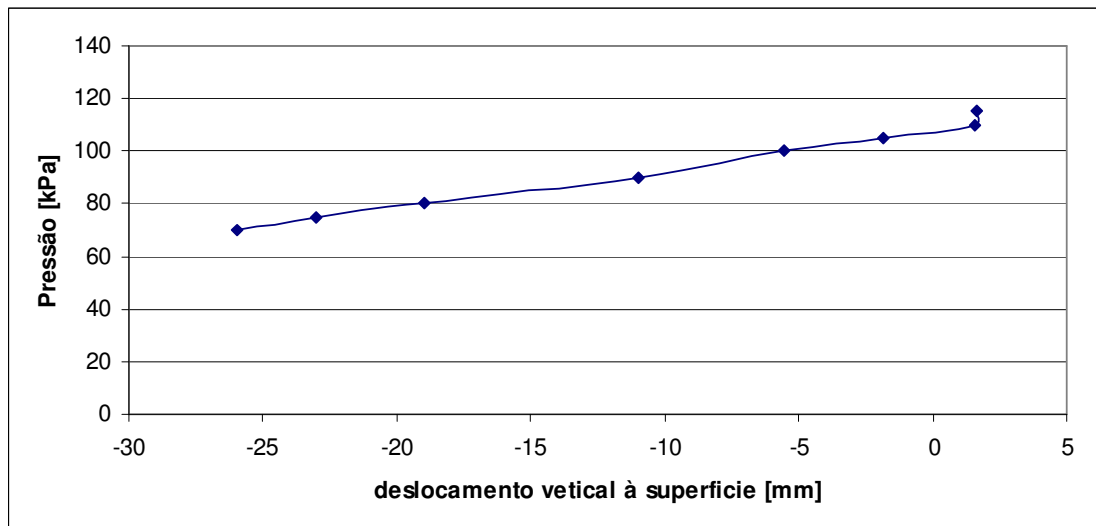


(b)

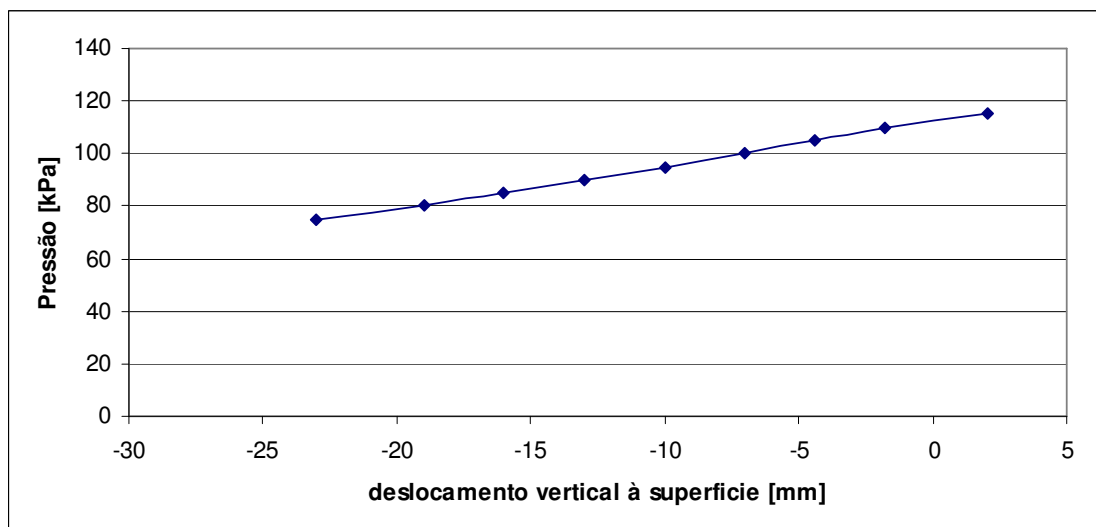
Figura 5.20 – Bacias de subsidência para a pressão aplicada no arco para o modelo: (a) sem Areia 3 e (b) com Areia 3

Verifica-se pela análise dos resultados da Figura 5.20 que ocorrem empolamentos para pressões na ordem dos 100kPa para o modelo sem Areia 3, e de 115kPa para o modelo com Areia 3. Para o último modelo pode verificar-se que os deslocamentos devidos à injeção de compensação no arco ocorrem de uma forma mais controlada.

Na Figura 5.21 (a) e (b) estão representadas as evoluções dos deslocamentos verticais à superfície sobre o eixo do túnel em função da pressão de injeção aplicada. Na Figura 5.22 estão representadas as áreas de subsidência para ambos os modelos.

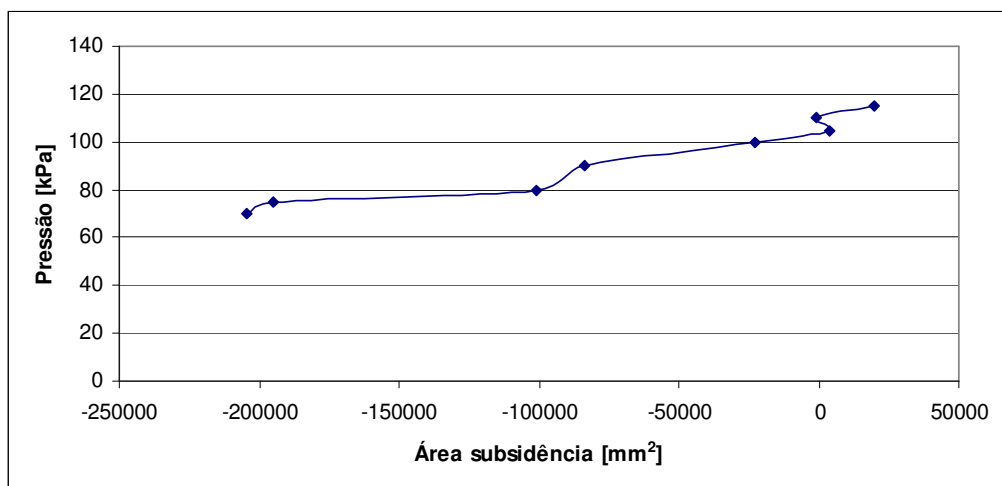


(a)

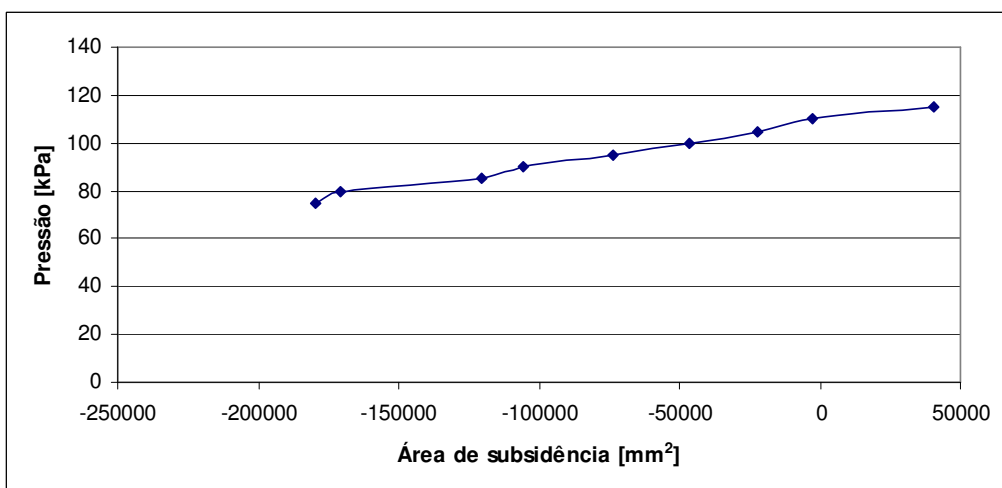


(b)

Figura 5.21 - Curva pressão aplicada no arco vs. deslocamentos verticais à superfície sobre o eixo do túnel para o modelo: (a) sem Areia 3 e (b) com Areia 3



(a)



(b)

Figura 5.22 - Curvas de pressão aplicada no arco vs. área de subsidência para o modelo: (a) sem Areia 3 e (b) com Areia 3

5.2.3.4. Cálculo da escavação do túnel pelo método da diminuição de pressão com pressão de compensação no arco para o modelo sem Areia 3

Para verificar a validade de um programa de injeção no arco representado na Figura 5.4, considerando o modelo sem tratamento de consolidação, criou-se um modelo com pressões sequenciais. Este modelo visa simular a escavação gradual de um túnel com aplicação de pressão no arco controladamente. Para cada fase de cálculo existe uma pressão normal aplicada na face do túnel ($P_{\text{túnel}}$) e uma pressão aplicada no arco (P_{arco}).

No Quadro 5.7 estão representados os deslocamentos verticais à superfície, para cada fase de cálculo. As bacias de subsidência correspondentes a cada fase de cálculo estão representadas na Figura 5.23.

Quadro 5.7 – Deslocamentos superficiais com indicação das fases de cálculo

Fase de cálculo	Coordenadas Hor. [m]	0,00	1,69	3,47	5,36	8,41	12,91	17,96	22,16	26,73	30,00
	(Ptúnel;Parco) [kPa]	Deslocamentos verticais à superfície [mm]									
1	(200;-)	-3,683	-3,578	-3,273	-2,774	-1,823	-0,531	0,398	0,786	0,933	0,963
2	(190;-)	-0,407	-3,964	-3,646	-3,132	-2,143	-0,788	0,192	0,622	0,788	0,822
3	(190;100)	-2,625	-2,433	-2,085	-1,707	-1,027	-0,128	0,519	0,817	0,922	0,945
4	(190;105)	-0,331	-0,275	0,731	0,482	0,169	0,263	0,616	0,843	0,928	0,947
5	(180;110)	-0,544	-0,489	0,511	0,253	-0,050	0,040	0,437	0,696	0,801	0,825
6	(170;110)	-0,760	-0,707	0,284	0,013	-0,307	-0,210	0,225	0,512	0,636	0,664
7	(160;110)	-0,971	-0,921	0,064	-0,217	-0,548	-0,436	0,040	0,358	0,501	0,533
8	(150;110)	1,226	1,604	3,102	1,993	0,518	-0,276	-0,065	0,218	0,365	0,399
9	(140;110)	0,960	1,335	2,826	1,707	0,228	-0,542	-0,271	0,052	0,224	0,263
10	(130;110)	0,648	1,022	2,507	1,381	-0,097	-0,829	-0,488	-0,118	0,082	0,127
11	(120;110)	0,258	0,632	2,115	0,988	-0,472	-1,144	-0,714	-0,290	-0,056	-0,005
12	(120;115)	0,181	0,556	2,046	0,931	-0,505	-1,151	-0,707	-0,277	-0,041	0,011
13	(110;115)	-0,246	0,128	1,616	0,500	-0,919	-1,490	-0,943	-0,452	-0,180	-0,120
14	(100;115)	-1,458	-1,059	0,506	-0,480	-0,162	-1,777	-0,954	-0,365	-0,054	0,129
15	(90;115)	0,612	1,181	3,090	1,387	-0,758	-1,700	-1,030	-0,426	-0,091	-0,019

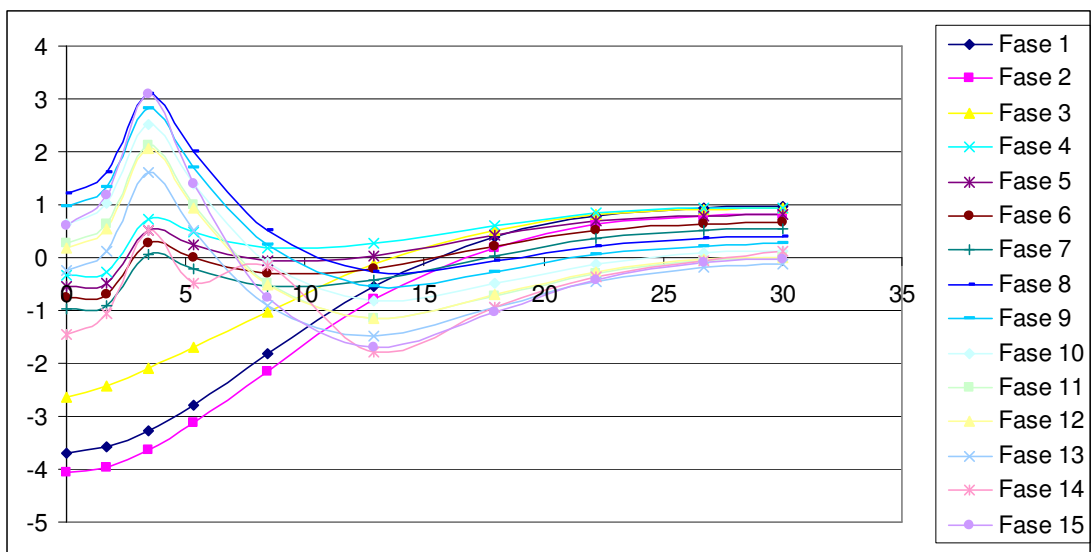


Figura 5.23 – Bacias de subsidência para as várias fases de cálculo

Como se pode verificar pela Figura 5.24, os deslocamentos verticais à superfície sobre o eixo do túnel são minimizados com a aplicação da pressão no arco (injecção de calda por compensação), enquanto os deslocamentos no coroamento do túnel continuam a aumentar. O deslocamento máximo à superfície corresponde a cerca de 3,0mm no sentido oposto ao sentido do deslocamento do túnel, pelo que se verifica um excelente comportamento do solo aquando da injecção da calda, contrariando completamente os assentamentos esperados.

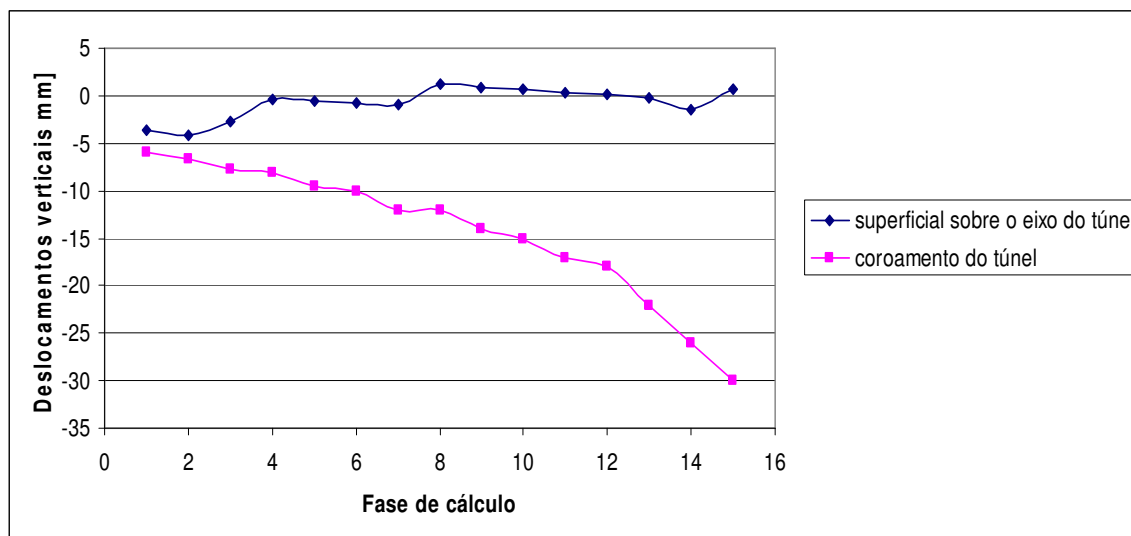


Figura 5.24 – Deslocamento superficial sobre o eixo do túnel e deslocamento do coroamento do túnel vs. fase de cálculo

Nas Figura 5.25 a Figura 5.30, estão representados os deslocamentos verticais do modelo para as fases 5, 11 e 15 através de isolinhas e vectores de deslocamento. Pode verificar-se que abaixo do arco de injeção os deslocamentos são bastante superiores aos deslocamentos verificados acima dessa zona. Os deslocamentos à superfície para as fases representadas, são de cerca de 6 a 16 vezes menores que os deslocamentos no coroamento do túnel.

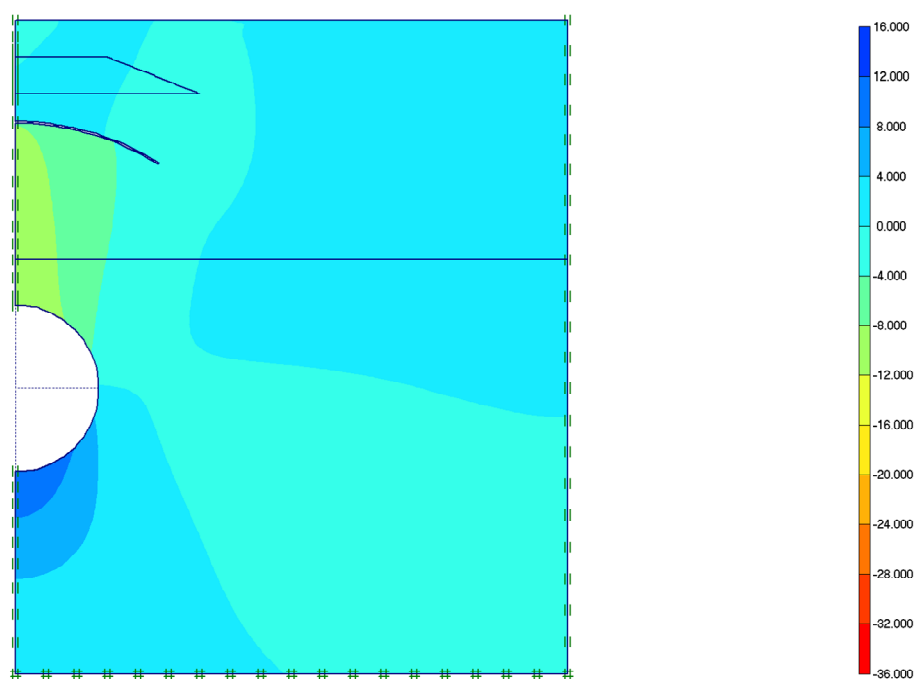


Figura 5.25 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 5

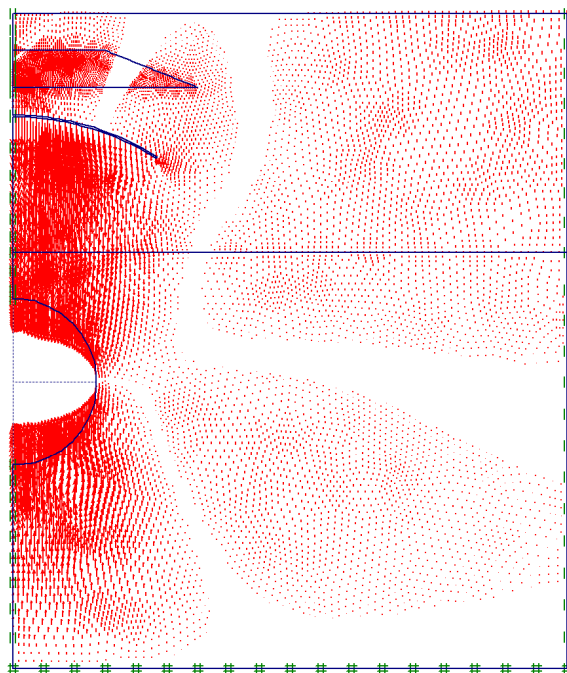


Figura 5.26 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 5

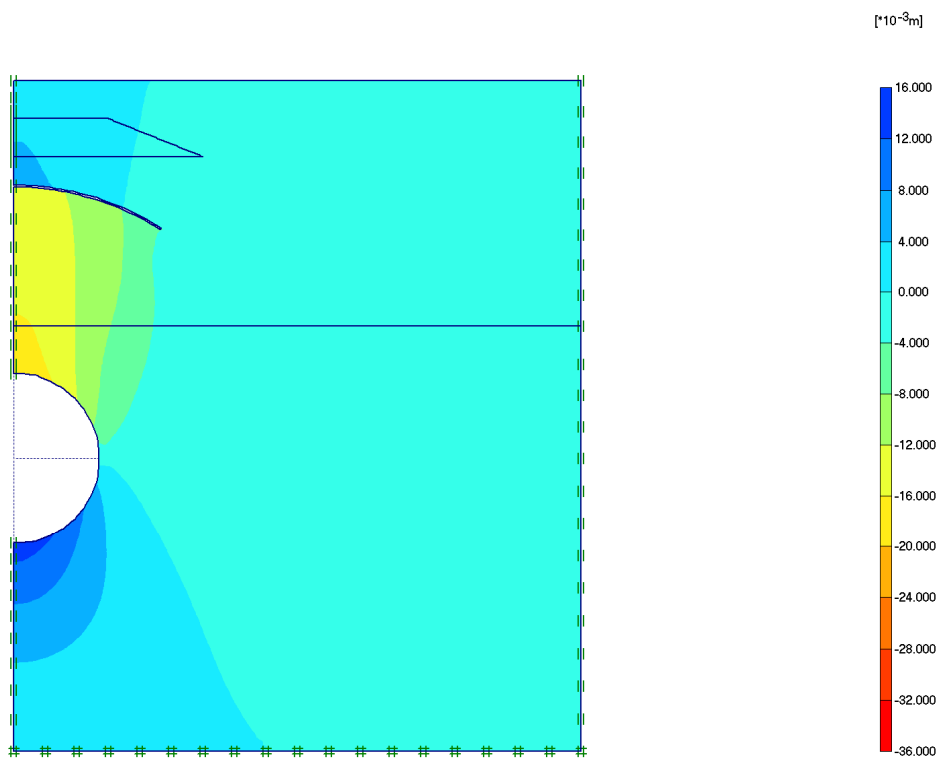


Figura 5.27 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 11

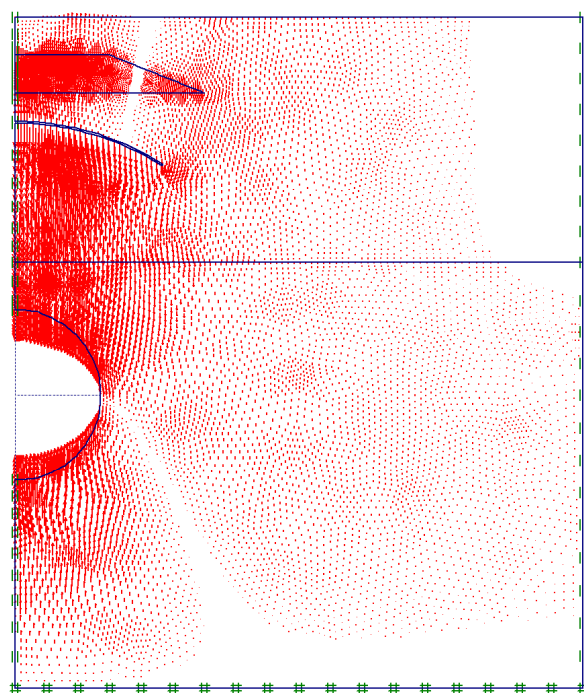


Figura 5.28 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 11

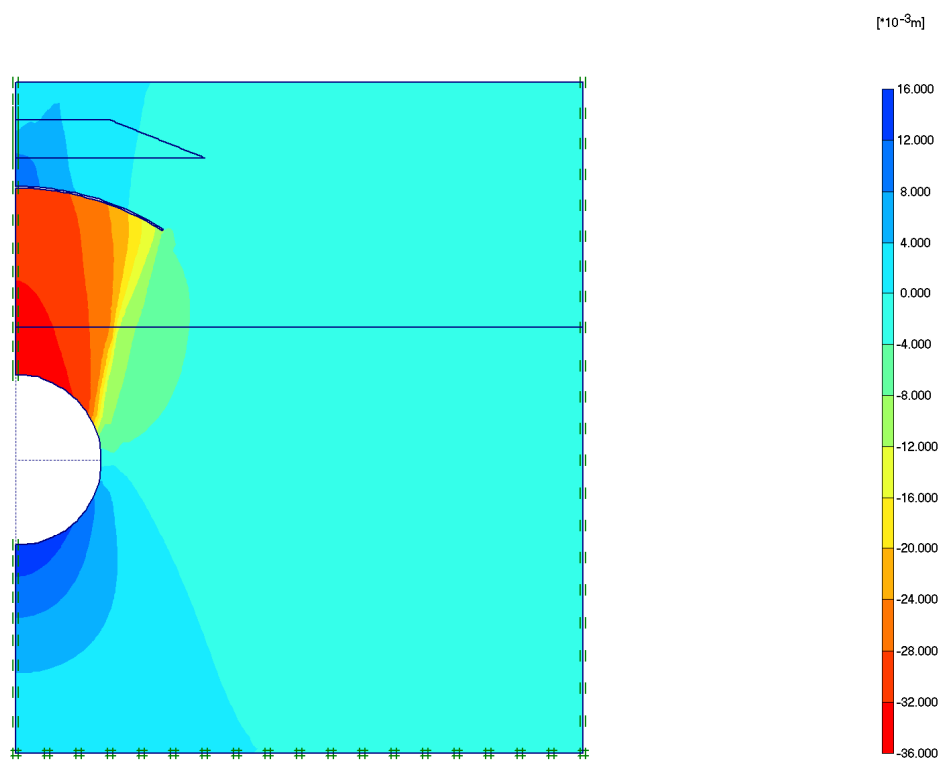


Figura 5.29 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 15

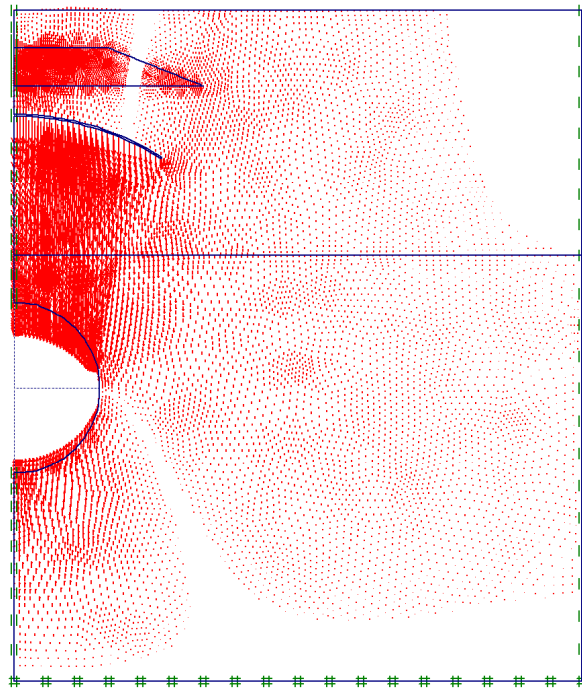


Figura 5.30 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 15

5.2.3.5. Cálculo da escavação do túnel pelo método da diminuição de pressão com pressão de compensação no arco para o modelo com Areia 3

Neste ponto, são refeitas as fases de cálculo do ponto anterior, mas no caso da existência de Areia 3, que preconiza um melhoramento do solo por consolidação já referido. O Quadro 5.8 Indica os deslocamentos verticais à superfície aquando da aplicação da pressão no túnel ($P_{túnel}$) e da pressão no arco (P_{arco}) referente a cada fase de cálculo.

Quadro 5.8 – Deslocamentos superficiais com indicação das fases de cálculo

Fase de cálculo	Coordenadas Hor. [m]	0,00	1,69	3,47	5,36	8,41	12,91	17,96	22,16	26,73	30,00
	(Ptúnel;Parco) [kPa]	Deslocamentos verticais à superfície [mm]									
1	(200;-)	-3,695	-3,610	-3,360	-2,945	-2,008	-0,567	0,393	0,779	0,938	0,967
2	(190;-)	-4,070	-3,983	-3,725	-3,296	-2,325	-0,818	0,194	0,614	0,792	0,826
3	(190;100)	-4,113	-3,966	-3,556	-2,965	-1,820	-0,356	0,486	0,815	0,945	0,969
4	(190;105)	-2,491	-2,389	-2,121	-1,758	-1,081	-0,124	0,552	0,848	0,969	0,992
5	(180;110)	-0,919	-0,858	-0,763	-0,676	-0,522	-0,093	0,440	0,731	0,862	0,884
6	(170;110)	-1,138	-1,080	-0,990	-0,912	-0,771	-0,335	0,230	0,547	0,696	0,727
7	(160;110)	-1,356	-1,298	-1,213	-1,141	-1,008	-0,556	0,047	0,394	0,562	0,597
8	(150;110)	-1,611	-1,555	-1,474	-1,407	-1,280	-0,805	-0,154	0,228	0,419	0,459
9	(140;110)	-1,898	-1,843	-1,764	-1,702	-1,575	-1,069	-0,362	0,060	0,276	0,322
10	(130;110)	-2,215	-2,161	-2,085	-2,026	-1,896	-1,349	-0,577	-0,112	0,132	0,185
11	(130;115)	-0,515	-0,389	-0,364	-0,774	-1,344	-1,353	-0,686	-0,202	0,064	0,124
12	(120;115)	-0,522	-0,395	-0,370	-0,778	-1,346	-1,353	-0,686	-0,202	0,065	0,124
13	(110;115)	-1,161	-1,028	-0,983	-1,360	-1,840	-1,668	-0,844	-0,288	0,016	0,083
14	(100;115)	-1,856	-1,716	-1,651	-1,992	-2,380	-2,016	-1,015	-0,375	-0,029	0,046
15	(100;120)	0,171	0,375	0,796	-0,175	-1,424	-1,739	-0,939	-0,332	0,010	0,085
16	(90;120)	-0,444	-0,234	0,207	-0,734	-1,891	-2,025	-1,071	-0,395	-0,018	0,064

As bacias de subsidência correspondentes às fases de cálculo indicadas estão representadas na Figura 5.31.

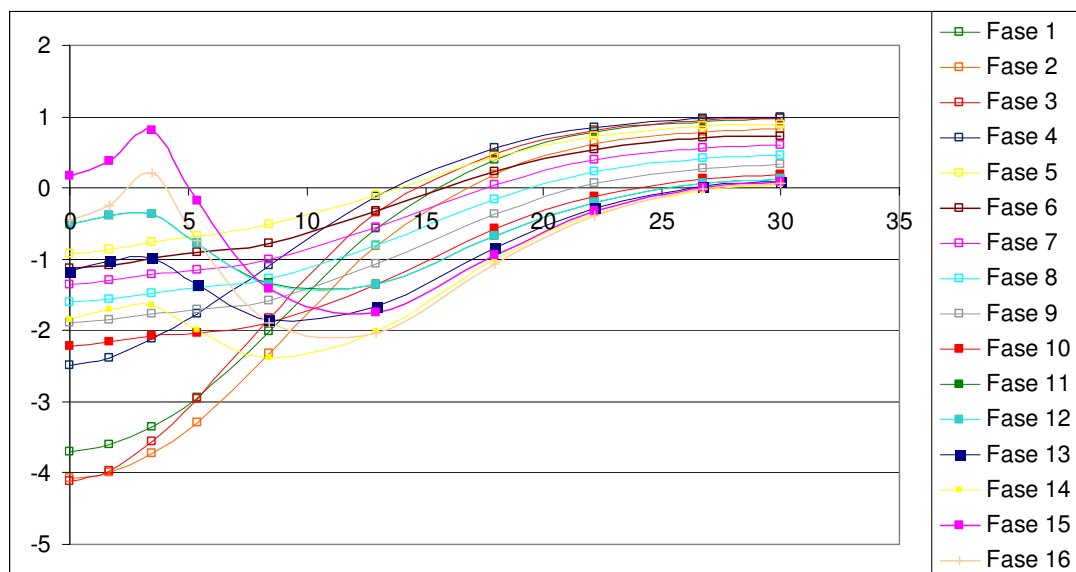


Figura 5.31 – Bacias de subsidência para as várias fases de cálculo

A Figura 5.32 representa a evolução dos deslocamentos verticais à superfície e do coroamento do túnel para cada fase de cálculo, para o modelo considerado.

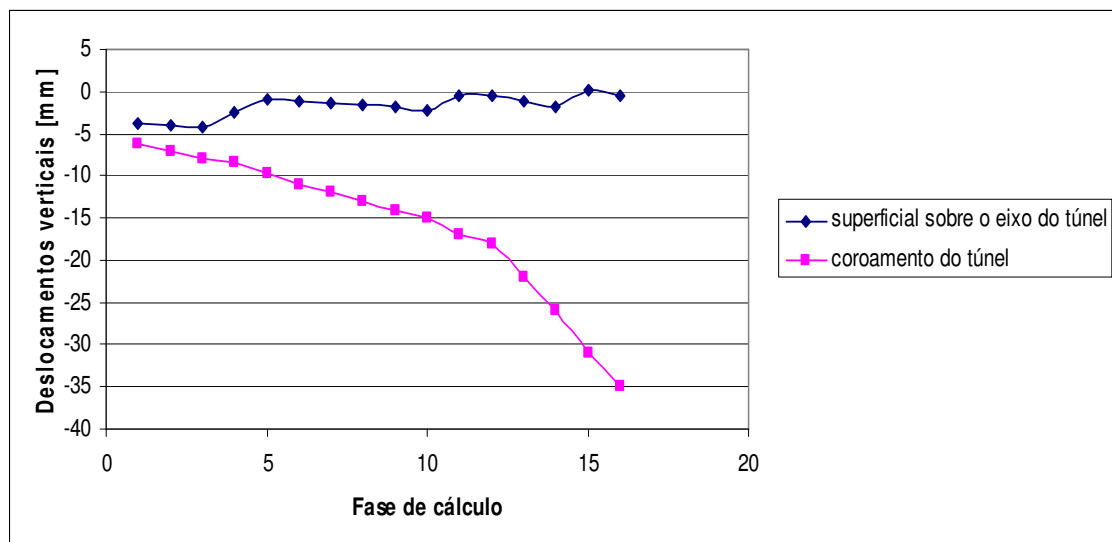


Figura 5.32 – Deslocamento superficial sobre o eixo do túnel e deslocamento do coroamento do túnel vs. fase de cálculo

As isolinhas e vectores de deslocamentos verticais do terreno para as fases 5, 11 e 16 estão representados nas Figura 5.33 a Figura 5.38.

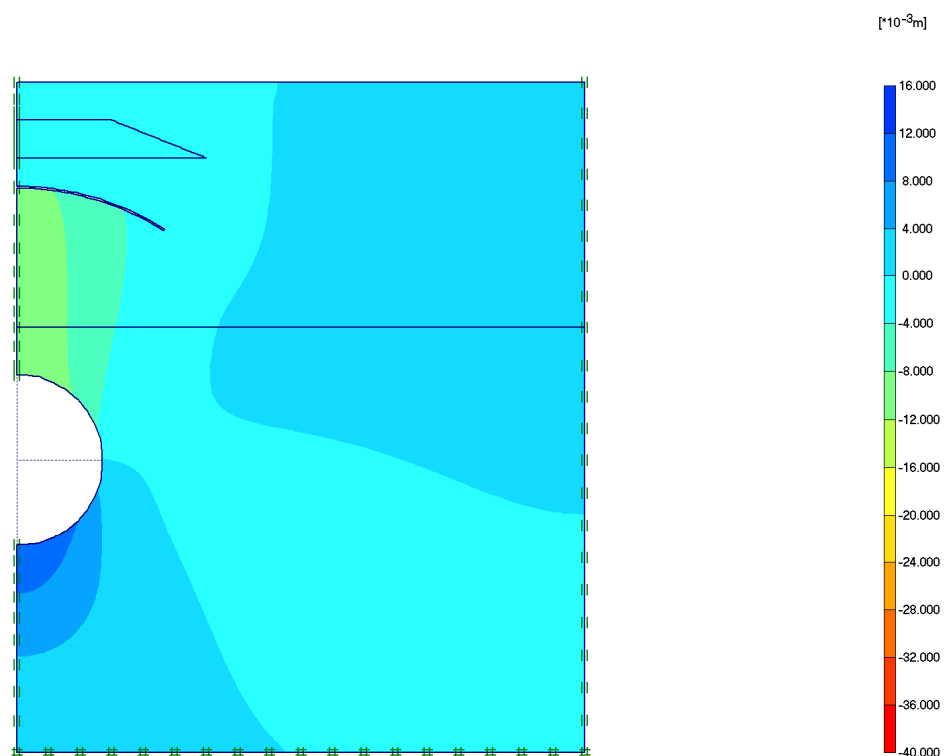


Figura 5.33 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 5

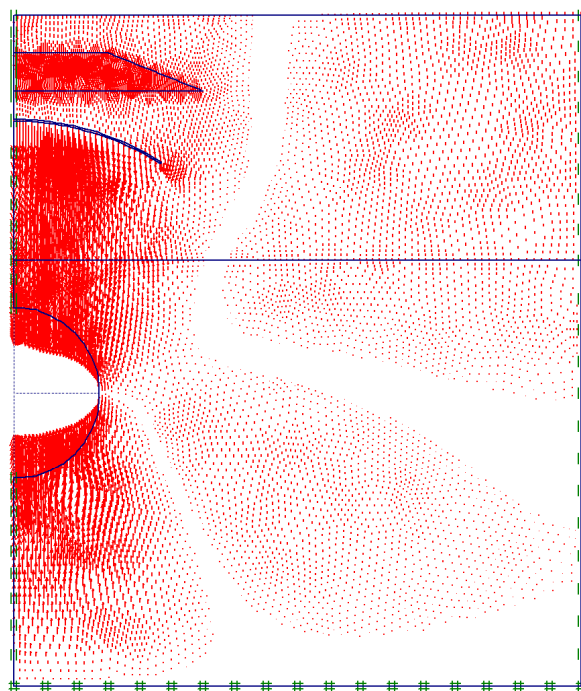


Figura 5.34 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 5

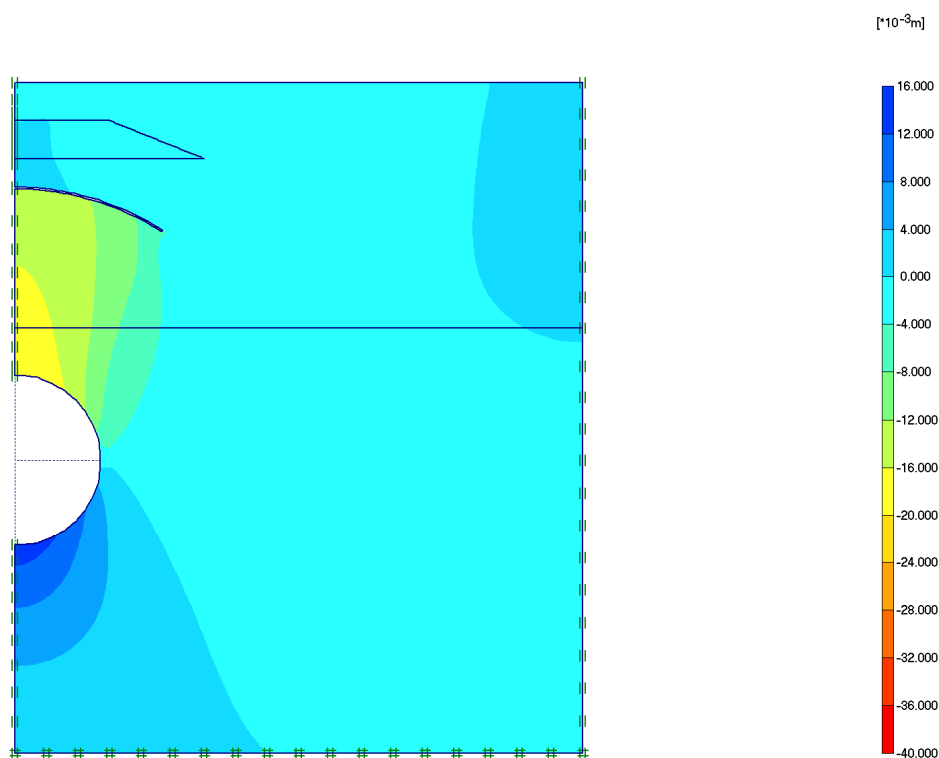


Figura 5.35 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 11

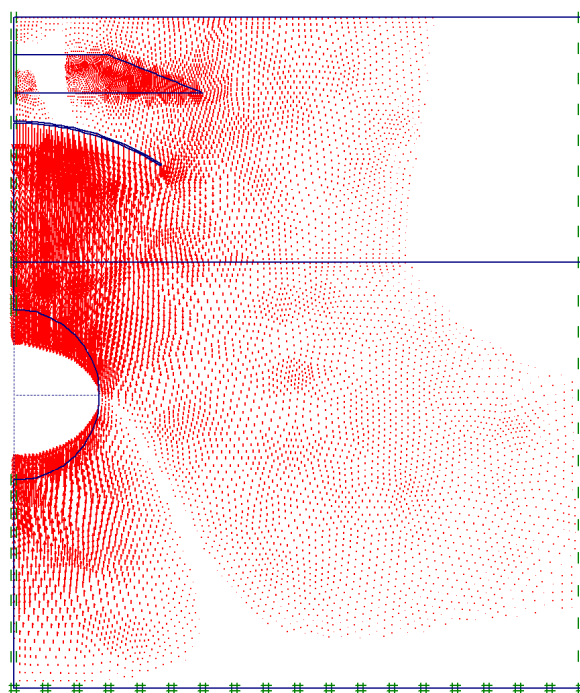


Figura 5.36 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 11

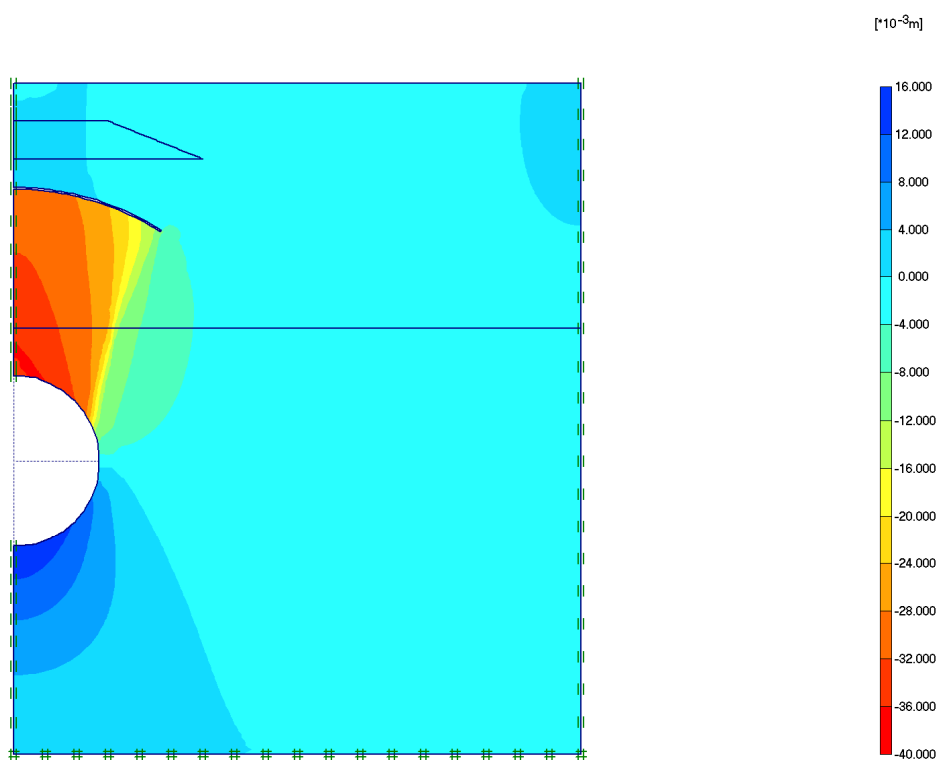


Figura 5.37 – Isolinhas de deslocamento vertical para a fase de cálculo 16

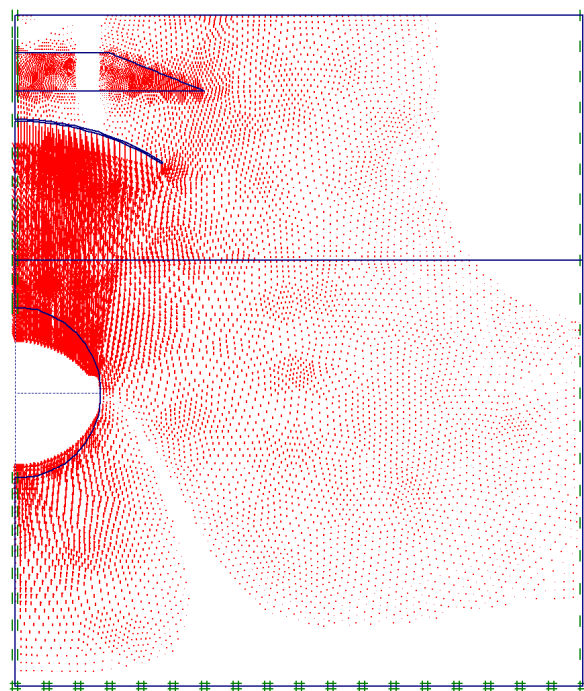


Figura 5.38 – Vectores de deslocamento vertical para a fase de cálculo 16

5.2.4. Comparação dos resultados

O método da contracção foi aplicado para calibrar a área de subsidência nos restantes cálculos com os valores 0,5 e 1,0% de contracção (valores correntes para solos do tipo arenoso acima da superfície freática).

Na comparação dos resultados dos cálculos dos modelos em que se efectua a diminuição da pressão de sustentação do túnel com aumento da pressão de compensação no arco com e sem Areia 3, pode verificar-se que no modelo com Areia 3 os assentamentos são maiores. Este facto deve-se ao aumento do peso do terreno aquando da existência de Areia 3, dado o seu maior peso específico em relação à Areia 2.

No entanto, pode verificar-se pelas curvas de subsidência que a Areia 3 confere maior rigidez, limitando as deformações acentuadas verificadas à superfície do terreno. A maior vantagem do modelo com o tratamento de consolidação (Areia 3) é a melhoria no que se refere ao controlo dos deslocamentos à superfície provocados pela injeção de compensação como se pode verificar pela Figura 5.39.

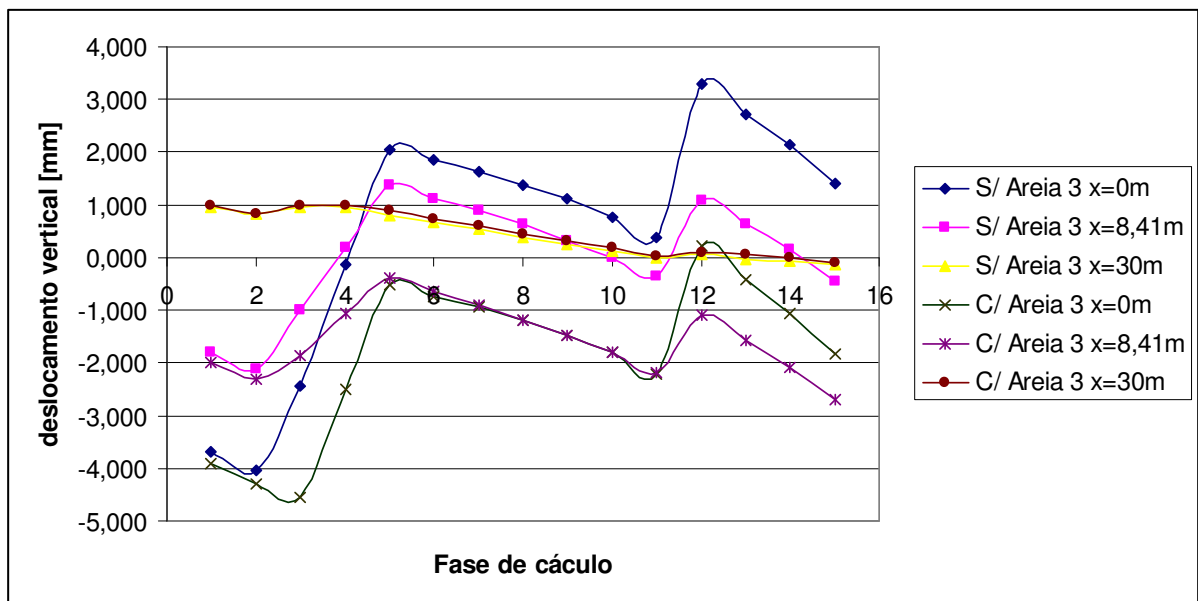


Figura 5.39 – Curvas de deslocamento ao nível do terreno para os modelos com diminuição de pressão no túnel e aumento da pressão de compensação no arco

6. Considerações Finais

Um trabalho de injeção de calda é sempre uma obra que envolve algum risco do ponto de vista ambiental e estrutural dada a introdução de esforços no terreno. É no entanto uma solução eficaz e que permite solucionar um vasto leque de problemas geotécnicos, como são exemplo a redução da permeabilidade do solo e a redução dos assentamentos devido ao alívio de tensões no terreno, o fortalecimento do solo para melhoria da resposta das fundações ou ainda a densificação do solo para prevenir a liquefacção.

A injeção de calda para melhoramento dos terrenos é assim um método eficaz que exige a definição de uma metodologia de dimensionamento, de modo a adequar as características dos materiais, técnicas e instrumentação a empregar, com o objectivo do tratamento, o terreno a melhorar e as limitações impostas.

Esta metodologia baseia-se em reunir informação relacionada com a definição do objectivo do tratamento, caracterização do local e suas limitações, caracterização do solo a tratar, escolha do tipo de calda e materiais constituintes, selecção do método de injeção, instrumentação necessária e ensaios.

Após reunir toda esta informação deve ser avaliada a adequabilidade da utilização da técnica, e no caso da sua utilização devem ser definidos os parâmetros de injeção (volume, pressão e caudal), furação padrão, posição relativa dos furos e a sequência de injeções

A supervisão, monitorização e controlo devem ser asseguradas ao longo de todo o processo, e se necessário possibilitarem a alteração dos parâmetros de dimensionamento. Devem ser monitorizados e controlados os movimentos e deformações do terreno e das estruturas adjacentes, as propriedades da mistura durante a sua preparação e aplicação, as tolerâncias de inclinação dos furos e todos os restantes pressupostos definidos na fase de dimensionamento da obra,

Como foi referido no Capítulo 2 existe um vasto leque de instrumentos que podem ser utilizados, consoante os objectivos do tratamento, a técnica utilizada ou os materiais constituintes da mistura. Estes instrumentos enquadram-se nas fases de furação, mistura e preparação da calda, bombagem e condução, injeção e supervisão, monitorização e controlo. Na fase de perfuração do solo ou rocha a

utilização das sondas rotativas ou roto-percutivas é o mais usual, mas pode também ser utilizada uma furação através de instrumentos mais tradicionais como é o caso da ferramenta de cabo que permite reduzir os custos totais da obra. Também a selecção da instrumentação relativa à preparação da mistura, bombagem, injeção e controlo e monitorização se reveste de grande importância dada a necessidade de obter as condições ideais para satisfazer o objectivo do tratamento e salvaguardar a sua durabilidade durante a vida útil da obra.

Consoante o objectivo e as condições locais da zona a tratar deve ser seleccionada uma das seis técnicas fundamentais de injeção – Permeação, Rocha, Compactação, *Jet Grouting*, Compensação e Fracturação Hidráulica. De entre as seis técnicas três não exigem a substituição ou deslocamento do terreno – Jet Grouting, Compactação e Fracturação Hidráulica – enquanto que as restantes o exigem.

A injeção por Fracturação Hidráulica é uma das técnicas mais eficaz, apresentando vantagens na redução de assentamentos devido à construção de obras subterrâneas em solos finos granulares, de forma mais económica dada a possibilidade de injectar a caudais e pressões mais elevadas e de forma controlada.

É do conhecimento geral que os materiais à base de cimento são amplamente utilizados em obras de construção civil, como betão ou caldas. No entanto, estes materiais apresentam uma característica que pode pôr em causa a sua função - reduzida resistência à tracção. Num caso de injeção de caldas de cimento-bentonite esta resistência deve ser assegurada, dado que no caso de surgimento de fendilhação, a permeabilidade da calda aumenta acelerando a sua degradação. Em casos de tratamento para redução da permeabilidade do solo, a sua função pode ficar anulada.

Dos ensaios referidos no Capítulo 4 conclui-se que o da placa circular com modo de rotura imposto, é o mais indicado para a avaliação da resistência à tracção de provetes. Este ensaio apresenta menor percentagem de erro nos resultados devido às suas condições de apoio pontuais e maior facilidade de execução. Da modelação numérica deste ensaio no software ANSYS v.11 para a obtenção dos parâmetros de uma calda de cimento-bentonite conseguem obter-se iterativamente os valores do módulo de elasticidade e da resistência à tracção do material.

Os valores dos parâmetros obtidos são um Módulo de Elasticidade igual a 3517MPa e resistência à tracção igual a 218kPa, considerando o coeficiente de

Poisson igual a 0,20. O valor obtido para o módulo de elasticidade indica que estamos na presença de um material muito deformável e o valor da resistência à tracção revela a fragilidade do material quando sujeito a esse esforço. Há que considerar que este material quando injectado a altas pressões sofrerá uma pressão de confinamento que deverá reduzir a sua fragilidade. Há que considerar que a calda não tem uma função estrutural, mas de preenchimento conferindo ao terreno uma resistência mecânica global superior por supressão dos vazios.

Os cálculos do modelo computacional descritos no capítulo 4 revelam a eficiência do tratamento de solos através da injeção de material. Pelo que se pode verificar através da comparação dos resultados dos modelos com e sem tratamento por compensação (Areia 3), o terreno sofre maiores deslocamentos para o modelo tratado. Estes maiores deslocamentos devem-se ao aumento do peso do solo (peso volúmico da Areia 3 superior ao da Areia 2). Este tratamento funciona fundamentalmente como um acréscimo de rigidez do terreno, como se pode verificar nas curvas das bacias de subsidência em que o solo sobre a Areia 3, não cria zonas de empolamentos pontuais, ao contrário do que acontece no caso do modelo sem tratamento.

Quanto à aplicação da injeção de compensação preconizada através da aplicação de pressões no arco, pode verificar-se que se trata de uma forma eficaz de redução dos assentamentos superficiais aquando da escavação para construção de túneis. Esta solução demonstra a possibilidade de redução dos assentamentos à superfície em 16 vezes em relação ao deslocamento do coroamento do túnel.

Futuramente julgo ser importante o desenvolvimento de estudos com base noutras caldas de injeção, em especial aquelas que não são constituídas por cimento. Para estas caldas as condicionantes são concerteza diferentes, não sendo a resistência à tracção um parâmetro preponderante, como acontece para os materiais cimentícios. Seria interessante o estudo comparativo desse tipo de material, com a calda de cimento-bentonite utilizada nesta dissertação para avaliação da eficiência, através de um modelo idêntico ao utilizado.

Outro elemento que daria um grande contributo para o desenvolvimento desta técnica de melhoramento, seria o estudo mais aprofundado da influência dos componentes das caldas com as condições do terreno. Este ponto é de grande

relevância, visto que pode ser posta em causa a durabilidade do melhoramento durante a vida útil do projecto e/ou provocar danos ambientais irreversíveis.

Referências Bibliográficas

- [1] A. Aydin e A. Basu (2005)
The use of Brazilian Test as a Quantitative Measure of Rock Weathering
Rock Mechanics and Rock Engineering, vol.39, no.1, Springer Wien
- [2] *ANSYS Manual, Release Documentation 11.0 for ANSYS* (2007)
- [3] C. G. Rawlings, E. E. Hellawell e W. M. Kilkenny (2000)
Grouting for Ground Engineering, CIRIA
- [4] C. Molins, A. Aguado e S. Saludes (2008)
Double Punch Test to control the energy dissipation in tension of FRC
(Barcelona Test)
Journal Materials and Structures, vol.42, no.4, pp. 415-425, RILEM
- [5] C. Soranakom, B. Mobasher e X. Destrée (2007)
Numerical Simulation of FRC Round Panel Tests and Full-Scale Elevated
Slabs
ACI SP-248-3, pp. 31-40
- [6] D. Kachlakev e T. Miller (2001)
*Finite Element Modelling of Reinforced Concrete Structures Strengthened
with FRP Laminates – Final Report*
- [7] *EN 12715 – “Execution of special geotechnical work – Grouting”* (2000)
- [8] E. S. Bernard (1999)
Behaviour of Round Steel fibre reinforced concrete panels under point
loads
Materials and Structures, vol.33, no.3, pp.181-188, RILEM

- [9] E. S. Bernard (2002)
Correlations in the behaviour of the fibre reinforced shotcrete beam and panel specimens
Materials and Structures, vol.35, no.3, pp.156-164, RILEM

- [10] E. S. Bernard (2004)
Design performance requirements for fibre reinforced shotcrete using ASTM C-1550
Shotcrete: More Engineering Developments , pp. 67-80

- [11] E. S. Bernard (2000)
Round Determinate Panel Testing in Australia
Shotcrete Magazine, vol.2, no.2, pp. 12-15

- [12] G. C. Chian
Technical Seminar on Fibre Reinforced Sprayed Concrete State of the Art, Specifications, and Standards

- [13] H. Xie (1993)
Fractals in rock mechanics, Taylor & Francis Group

- [14] H. R. Asche e E. S. Bernard (2004)
Shotcrete design and specification for the Cross City Tunnel, Sydney
Shotcrete: More Engineering Developments, pp. 27-37

- [15] K. Amade e J. Bilé Serra (2010)
Caracterização experimental de uma calda de cimento-bentonite com traço 1:1:2%
Relatório DG/NT xxx/2010 (no prelo)

- [16] L. Biolzi, S.Cattaneo e G. Rosati (2001)
Flexural/Tensile Strength Ratio in Rock-like Materials
Rock Mechanics and Rock Engineering, vol.34, no.3, pp. 217-233, Springer Wien

- [17] M. Panet (2001)
AFTES Recommendations on the convergence-confinement method

- [18] NP EN 1992 (Eurocode 2) – “Design of concrete structures”; Part 1-1:
General rule and rule for buildings (2004)

- [19] NP EN 12390-6 - “Ensaaios do Betão Endurecido”; Parte 6: Resistência à
Tracção por compressão de provetes (2003)

- [20] N. V. Marc Vandewalle e S. A. Bekaert (2005)
Tunnelling is an Art

- [21] P. Fernando e M. Guedes de Melo (2003)
Métodos simplificados de dimensionamento de túneis em solos
*Folhas da cadeira de Túneis e Obras Subterrâneas do Mestrado em
Geotecnia para Engenharia Civil*

- [22] PLAXIS Manuals, Version 8 (2002)

- [23] S. S. Buffoni
Tensões de Flexão nas Vigas
Apontamentos de Resistência de Materiais

- [24] S. S. Requena (2006)
Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón reforzado con
fibras (ensayo Barcelona)
*Tese de Mestrado - Universitat Politècnica de Catalunya. Departament
d'Enginyeria de la Construcció*